

DIE SCHONENDE TROCKNUNG
VON TEMPERATUREMPFINDLICHEN GRANULATEN IM HOCHFREQUENZ -
FELD

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades
DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt
von
Thomas Köblitz
Erlangen, 1984



DIE SCHONENDE TROCKNUNG
VON TEMPERATUREMPFINDLICHEN GRANULATEN IM HOCHFREQUENZ -
FELD

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades
DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt
von
Thomas Köblitz
Erlangen, 1984

Als Dissertation genehmigt von der
Technischen Fakultät
der Universität Erlangen - Nürnberg

Tag der Einreichung: 19.6.1984

Tag der Promotion: 26.7.1984

Dekan: Prof. Dipl.-Ing. G. Vetter

Berichterstatter: Prof. Dr. S. Peter

Prof. Dr. O. Molerus

Prof. Dr. E. Nürnberg

Meinen Eltern

und

meiner Frau



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546217_0038

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.1	Einleitung	1
1.2	Problemstellung	2
2	TROCKNUNG IM HOCHFREQUENZFELD	4
2.1	Erzeugung der Hochfrequenz	4
2.2	Wirkung des Hochfrequenzfeldes	6
2.3	Veränderte Parameter und ihre Wechselwirkungen	12
2.4	Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Leistungsaufnahme und Elektrodenabstand	14
2.5	Trocknungsverläufe bei der Hochfrequenz-trocknung	20
3	THEORIE DER TROCKNUNG	22
3.1	Stoff- und Wärmetransport durchströmter Schüttungen	22
3.2	Der erste Trocknungsabschnitt	24
3.3	Der zweite Trocknungsabschnitt	26
4	TROCKNUNGSVERSUCHE	28
4.1	Versuchsanlage I	29
4.1.1	Beschreibung der Anlage	29
4.1.2	Versuchsdaten	31
4.1.2.1	Beschaffenheit des Trocknungsgutes	31
4.1.2.2	Trocknungsergebnisse und apparative Daten	32
4.1.2.3	Einflüsse auf thermolabile Wirkstoffe	37
4.1.2.4	Temperatur und Feuchte in Wechselwirkung mit dem Wirkstoff	39

4.1.2.5	Trocknungsgeschwindigkeit und Temperaturgradienten	43
4.1.3	Interpretation der Trocknungsergebnisse	46
4.1.4	Folgerungen aus dem Betrieb von Versuchsanlage I	50
4.1.5	Trocknung in der Wirbelschicht	55
4.1.6	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des die Vibrationswirbelschicht erzeugenden Schwingförderer	59
4.2	Versuchsanlage II	64
4.2.1	Beschreibung der Anlage	64
4.2.2	Veränderbare Parameter und ihre Wechselwirkungen	71
4.2.3	Vorversuche	72
4.2.3.1	Versuche zur Abstimmung des Arbeitsschwingkreises	73
4.2.3.2	Ermittlung der Optimaleinstellung des Arbeitsschwingkreises	75
4.2.4	Versuchsdaten	77
4.2.4.1	Leistungsantwort auf die Art der Feuchtdosierung	77
4.2.4.2	Leistungsaufnahme des Festbettes	83
4.2.4.3	Fließverhalten des Granulates in Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz	86
4.2.4.4	Einfluß der Fluidisierung auf den Trocknungsverlauf und die Guttemperatur bei gegensinniger Luftströmung	89
4.2.4.5	Einfluß der Fluidisierung auf den Trocknungsverlauf bei gleichsinniger Luftströmung	95
4.2.4.6	Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten gleich- und gegensinniger Luftströmung	96

4.2.4.7	Zusammenhang zwischen Abluft- und Granulattemperatur	100
4.2.4.8	Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeit verschiedener Granulate mit unterschiedlicher Anfangsfeuchte	108
4.2.4.9	Porosität und ihr Einfluß auf die Trocknungsgeschwindigkeit	110
4.2.4.10	Verhalten thermolabiler Wirkstoffe bei der Trocknung	113
4.3	Berechnung des Wirkungsgrades	114
4.4	Kostenvergleich	116
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	117
6	ZUSAMMENFASSUNG	119
	ZEICHENERKLÄRUNG	122
	LITERATURVERZEICHNIS	127
	ANHANG	133

1.1 Einleitung

Die Herstellung einer Tablette als Arzneiform erfolgt in mehreren Prozeßschritten. Die exakte Einhaltung der Herstellungsbedingungen garantiert eine hohe Produktionsrate und die absolute Reproduzierbarkeit. Die für Verpackungszwecke und zur zerstörungsfreien Entnahme einer Tablette aus der Durchdrückpackung notwendige mechanische Härte steht einer schnellen Zerfallzeit entgegen. Der Feuchtegehalt der Rohstoffmischung bedingt in einem gewissen Bereich die Bindekräfte und damit die Zerfallszeit, die ein Maß für den Wirkungseintritt des applizierten Arzneimittels darstellt. Sollen Tabletten mit einer hohen Produktionsrate gefertigt werden, muß das Nachfließen der Pulvermischung in dem Maße gewährleistet sein, daß bei dem geringen Gewicht einer Tablette und der hohen Ausstoßquote einer Tablettenpresse von mehreren hunderttausend Preßlingen pro Stunde keine Gewichtsschwankungen im Produkt entstehen können. Pulvermischungen besitzen diese Fließfähigkeiten meistens nicht. Um den Böschungswinkel zu verringern, bedient man sich des Effektes, daß Agglomerate ein deutlich verbessertes Fließverhalten zeigen und die Reproduzierbarkeit der Tablettenherstellung gewährleisten /1/. Mit Hilfe eines Granuliertvorganges lassen sich die gewünschten Agglomerate aus der Pulvermischung erzeugen. Dabei wird ein Fluid, z.B. Wasser zusammen mit einem Bindemittel zugesetzt. Dafür ist Voraussetzung, daß die Flüssigkeit gleichmäßig im Pulver verteilt wird und die erzeugte Masse die richtige Konsistenz besitzt, um die erforderlichen Bindekräfte entstehen zu lassen. Nach Ehrhardt /2/ verhält sich der Wirkstoffanteil in Partikeln nicht immer proportional zur Partikelgröße, sondern er kann exponentiell mit steigender Korngröße zunehmen. Daneben besitzen kleinere Partikel eine bessere Fließfähigkeit als größere. Thermische Belastung, insbesondere im feuchten Zustand, schädigt den thermolabilen Wirkstoff, der oberhalb einer spezifischen Temperatur in seine Abbauprodukte zerfällt, die sich ihrerseits als unwirksam oder schädlich bei der Applikation am Menschen erweisen.

Aus diesen Gründen ist es notwendig, die bei der Granulation zugeführte Flüssigkeit zur Vermeidung von Hydrolyse oder mikrobiellem Befall mechanisch und thermisch schonend zu entfernen.

1.2 Problemstellung

Der Verfahrensteilschritt der Granulation mit anschließender Trocknung wird im pharmazeutischen Produktionsprozeß peroraler Arzneiformen seit langer Zeit angewendet. Wurde das feuchte Granulat anfangs auf Horden in Trockenschränken entfeuchtet, so stellt sich das diskontinuierliche Wirbelschichtverfahren den heutigen Stand der Technik dar. Unter den Zeichen der Energieverteilung, der Emissionsproblematik und neueren Erkenntnissen der Sicherheitstechnik besteht die Notwendigkeit, neue billigere, sichere und emissionsfreie Verfahren zu erarbeiten.

Es sollte daher die Eignung des Verfahrens der Trocknung durch die dielektrische Erwärmung für die Trocknung pharmazeutischer Granulate untersucht werden. Dabei wurden in einem hochfrequenten Wechselfeld die Wasserdipole in Schwingungen versetzt, durch innere Reibung erwärmen sich diese und gehen aus dem flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über. Die Hochfrequenz Trocknung hat folgende Vorteile:

- Erwärmung z.B. innerhalb eines Pellets von innen nach außen
- geringer spezifischer Energieverbrauch
- Selbstregelung des Prozesses in Abhängigkeit von der aktuellen Feuchte

In Verbindung mit einer kontinuierlichen Zu- und Abfuhr des Granulates und einem geeigneten Transport durch den Apparat hindurch ist es möglich, schnell und bei geringer mechanischer und thermischer Belastung das Produkt mit wenig Luft zu trocknen.

In den zurückliegenden 30 Jahren wurden mehrfach Versuche unternommen, Pharmazeutika in verschiedenen Produktionsstufen mit Hochfrequenz zu trocknen. Schepky /3/ und Travers /4/ berichten anfangs der 70er Jahre bereits von erfolgreichen Versuchen, Tabletten bzw. Tablettengranulat im Hochfrequenzfeld zu behandeln. In der Lebensmittelindustrie wurde die Hochfrequenz dazu benutzt, Semmelbrösel unter gleichzeitigem Einsatz von Infrarot-Strahlen zu trocknen /5/. Ziel der Entwicklung muß es sein, ein trockenes Granulat zu erhalten, das mechanisch wenig belastet und thermisch schonend behandelt wird. Bei geringer mechanischer Belastung bleibt die gewünschte Agglomeratsstruktur erhalten. Je nach thermischer Empfindlichkeit der Wirkstoffe darf die Erwärmung des thermolabilen Wirkstoffes während der Trocknung einen Wert von 310 K längerfristig nicht überschreiten.

2 Trocknung im Hochfrequenzfeld

Bei den gegebenen physikalisch-chemischen Randbedingungen und unter der Voraussetzung, daß ein Trocknungsverfahren auf optimale Wirkungsgrade jeder apparativen Verfahrenskomponente ausgelegt sein soll, ist besonders darauf zu achten, daß die Brüdenabführung mittels Luft bei Minimierung der Luftmenge pro Zeiteinheit gewährleistet ist.

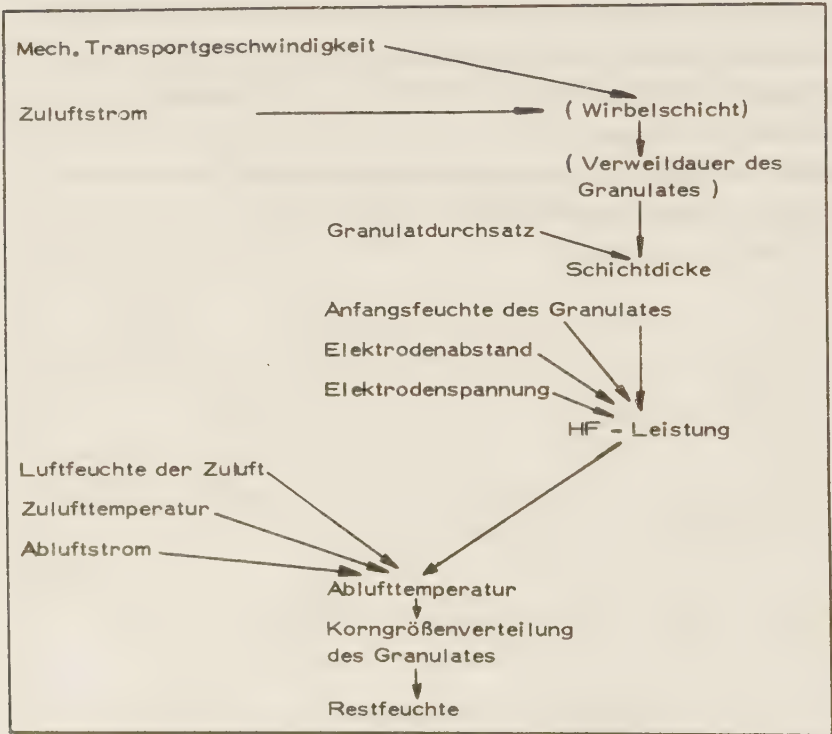


Abb. 1: Wechselwirkung der Parameter bei der Hochfrequenztrocknung

In Abbildung 1 sind die Prozeßparameter mit ihren Wechselwirkungen aufeinander und auf das Trocknungsergebnis schematisch dargestellt.

2.1 Erzeugung der Hochfrequenz

Zur Erzeugung der Hochfrequenzspannung, die das Arbeitsfeld im Kon-

densator aufbaut, sowie zur Heranführung der für die Erwärmung benötigten elektrischen Leistung dient ein Hochfrequenzgenerator /6/. Abbildung 2 zeigt das Prinzip seines Aufbaues. Die dem Transformator zugeführte Netzspannung wird auf einen Wert zwischen 10 und 15 kV transformiert und anschließend in einer Drehstrombrückenschaltung gleichgerichtet. Der negative Ausgang des Gleichrichters wird geerdet, der positive über einen Schutzwiderstand und Siebglie der Generatorröhre zugeführt. Diese erzeugt in Verbindung mit einem Schwing-

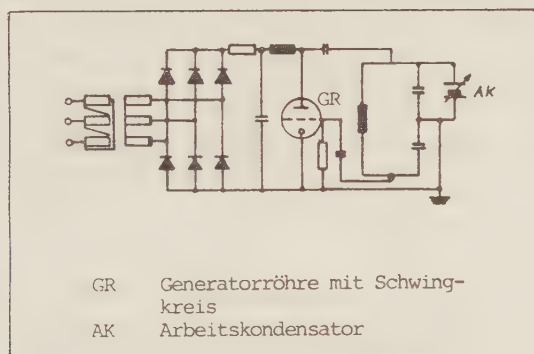


Abb.2: Prinzipschaltbild eines kapazitiven Hochfrequenz-Generators

kreis die benötigte Hochfrequenzspannung. Eine geeignet geformte Energieleitung führt diese den Behandlungselektroden des Arbeitskondensators zu, zwischen denen das Werkstück erwärmt wird. Die einfachste Form des Arbeitskondensators ist der Plattenkondensator. Er besteht aus zwei ebenen Platten, an denen die Hochfrequenzspannung anliegt. Zwischen ihnen besteht ein in erster Näherung homogenes elektrisches Feld, in welches das Bearbeitungsgut eingebracht wird. Es entstehen damit zwei "Teilkondensatoren", die zum einen aus dem Erwärmungsgut selbst und zum anderen aus dem Luftspalt zwischen dem Gut und der oberen Elektrode gebildet werden.

Die an die Elektrodenplatte angelegte hochfrequente Wechselspannung

hat eine Betriebsfrequenz von 13,56 MHz, die aus postalischen Gründen auf diesen Wert festgelegt ist. Die Polarität des elektrischen Wechselfeldes zwischen den Elektroden wird im Rhythmus der Generatorfrequenz geändert /7/. Dabei wird eine Spannung bis zu maximal 2000 V bei 10mm Abstand zwischen den Platten eingestellt werden (wegen Überschlag). Um die Elektrodenplatten herum muß ein Gehäuse aus elektrisch gut leitfähigem, antimagnetischem Stahl errichtet sein, das in seiner Wirkung als Faradayscher Käfig die entstehende Streustrahlung auf-fängt. Dies ist vor allem deswegen notwendig, weil die Frequenz von

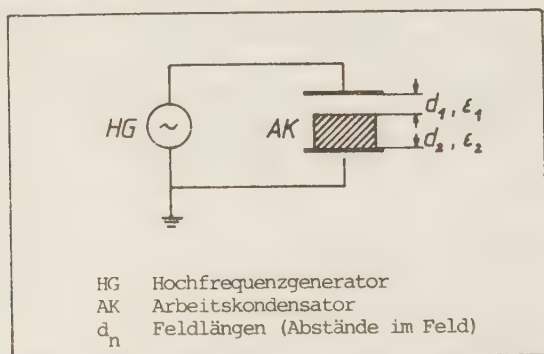


Abb. 3 Schema der dielektrischen Erwärmung zwischen zwei Platten-elektroden

13,56 MHz als industriell nutzbare Frequenz innerhalb des Rundfunk - Frequenzbereiches liegt und die Streustrahlung auch dieses Bereich stören kann. Zudem können isoliert stehende Metallteile in der Nähe des Arbeitskondensators als Empfänger wirken und gestört werden, bzw. induzierte Ströme mit hohen Spannungen können bei Berührung dieser Empfänger lokale Hochfrequenzverbrennungen am menschlichen Körper hervorrufen.

2.2 Wirkung des Hochfrequenzfeldes

Bringt man in ein hochfrequentes Wechselfeld einen nichtleitenden Körper, so erfährt dieser eine Erwärmung durch die in ihm vom Feld her-

vorggerufenen dielektrischen Verluste. Die Erwärmung ist dabei um so größer, je größer die Dielektrizitätskonstante des so behandelten Stoffes ist /6/. Auf geladene Teilchen und Dipole innerhalb des Dielektrikums, z.B. des Wassers, wirkt ein dem Primärfeld entgegengerichtetes, induziertes Feld, Primär- und Sekundärfeld polarisieren sich wechselweise mit der Frequenz von 13,56 MHz. Die Dipole schwingen dabei entsprechend dem angelegten Feld, jedoch mit einer bestimmten Phasenverschiebung, da die Schwingungen durch die Nachbarmoleküle behindert werden /8/. Durch eben diese Beeinträchtigungen treten Reibungskräfte auf, die sich als Erwärmung bemerkbar machen. Daher entsteht die Wärme nicht nur an der Oberfläche des Trocknungsgutes, sondern in jedem Volumenelement des zwischen den Elektroden befindlichen Körpers. Somit wird jeder Bereich eines beliebig geformten, homogenen Körpers gleichmäßig erwärmt. Diese Temperaturerhöhung vollzieht sich innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne. Innerhalb weniger Sekunden erreicht das in einem Granulat - Pellet enthaltene, weitgehend homogen verteilte Wasser die Siedetemperatur, oder es verdampft bei niedriger Temperatur, da die eingebrachte Energiedichte so groß ist, daß die Energiemenge pro Volumenelement und Zeiteinheit die Verdampfungsenthalpie des Wassers übersteigt. Die durch die Verdampfung an der Oberfläche freiwerdende Wärme wird sofort an die Umgebung abgegeben, sodaß sich die Oberfläche nur geringfügig erwärmt. Infolge des sich einstellenden Temperaturgradienten und der Konzentrationsdifferenz des Wasserdampfes in radialer Richtung diffundiert die Feuchte an die Oberfläche des Gutes, wo sie in die Umgebung übergeht. Die Energieaufnahme ist dem Feuchtegehalt des Granulates (vor Eintritt in den Trockner) proportional, d.h. je feuchter das Granulat, desto größer ist die pro Volumeneinheit aufgenommen und in Wärme umgewandelte Energie. Dies ist durch die wesentlich größere Dielektrizitätskonstante des Wassers im Vergleich zu der des Feststoffes begründet. Die von einer Volumeneinheit des Dielektrikums in einem elektrischen Wechselfeld der Frequenz absorbierte Leistung P ist nach /8/

$$P = 2 \pi \epsilon'_0 f E_d^2 \epsilon'_2 \tan \delta \quad (\text{wenn } \tan \delta \ll 0,2) \quad (1)$$

Wenn P in W/m^2 und die effektive Feldstärke E_d im Dielektrikum in V/m gemessen werden kann $\epsilon'_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ als Dielektrizitätskonstante des Vakuums und ϵ'_2 als die des Gutes angegeben werden. $\tan \delta$ ist der Verlustfaktor, der sich aus dem Verlustwinkel δ berechnet. Mit f wird die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes bezeichnet.

Mit der Gleichung

$$E_d = \frac{U}{d_2} \quad (2)$$

kann aus der effektiven Elektrodenspannung U und der Schichtdicke d_2 des Gutes die effektive Feldstärke E_d ermittelt werden, wenn dabei der Luftspalt zwischen Elektrode und Gut als Dielektrikum gegen die Breite 0 geht. Entsprechen die geometrischen Verhältnisse im Hochfrequenztrockner denen in Abb. 3 so ändert sich die Gleichung (2) in Gleichung (3) wie folgt:

$$E_d = \frac{U}{\epsilon'_2 \frac{d_1}{\epsilon'_1} + \frac{d_2}{\epsilon'_2}} \quad (3)$$

Die Indizes "2" beziehen sich dabei auf das eigentliche Nutzfeld. Im Plattenkondensator lassen sich kompakte Güter, wie dicke Platten aus Isolierstoffen, Textilspulen, Wolleballen u.ä. sehr schnell durchwärmen. Die Regelung der Leistungsübertragung ist dabei durch mechanische Änderung des Elektrodenabstandes in weiten Grenzen problemlos zu bewerkstelligen. Wenn das Erwärmungsgut nur dünn ist und seine Dicke d_2 sehr klein wird, d.h. nur wenige Millimeter ausmacht, reduziert sich die Teilspannung U_2 so, daß sie kaum für eine wirksame und schnelle Bildung von Wärme ausreicht. Nach Simmen /8/ ist bei konstanter Spannung U dann die Änderung der Feldstärke E_d und damit die

absorbierte Leistung am größten, wenn der Luftspalt sehr klein wird ($x_d = \frac{d_1}{d_2} \rightarrow 0$). Abbildung 4 verdeutlicht den Zusammenhang:

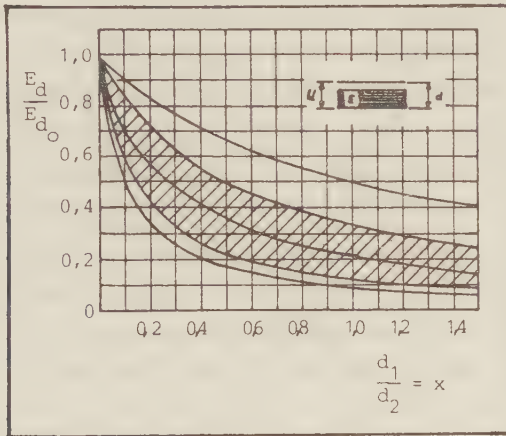


Abb.4: Graphische Darstellung zur Berechnung der Feldstärke in einem Dielektrikum bei Vorhandensein eines Luftspaltes zwischen dem Dielektrikum und der Elektrode
 x = Verhältnis von Luftspalt zu Schichtdicke des Gutes

Die Feldstärke E_d wird dann maximal und führt zu einer zufriedenstellenden Energieaufnahme, wenn das Erwärmungsgut nicht zu dünn und der Luftspalt zwischen Elektrode und Erwärmungsgut gegen 0 geht. Bei $x_d \leq 0,2$ wirkt sich die Änderung des Quotienten x_d überproportional auf den Wert von E_d aus, bei $x_d \leq 0,6$ bleibt eine Variation von x_d weitgehend ohne Einfluß auf die Größe von E_d .

Zur Bestimmung der richtigen Einstelldaten eines Hochfrequenzgenerators kann – bei bekannten Materialkonstanten und gegebener Erwärmungsgeschwindigkeit – das Diagramm von Maddock herangezogen werden, dessen obere Hälfte die rein kalorischen Daten berücksichtigt, die unteren Quadranten aber die Parameter für verschiedene Materialkonstanten wiedergeben. Dieses in Abb.5 dargestellte Diagramm /8/ ermöglicht die Bestimmung der Einstelldaten eines Hochfrequenzgenerators bei bekannten

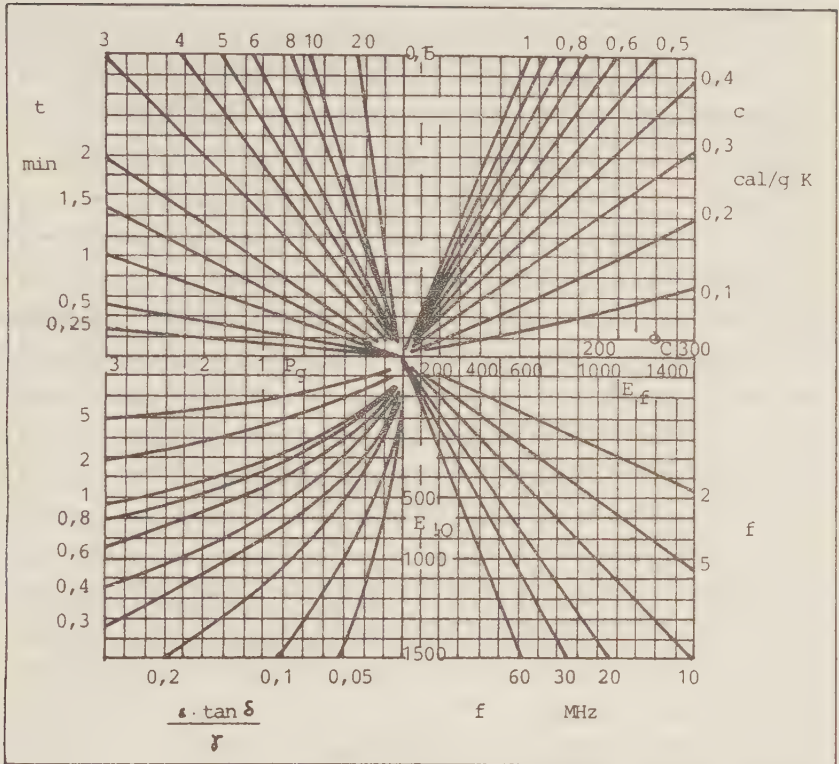
Materialkonstanten und gegebener Erwärmungsgeschwindigkeit. Die Feldstärke E_d muß jedoch so begrenzt werden, daß die Durchschlagspannung zwischen den Elektroden in keinem Fall erreicht wird, da bei einem Überschlag Material und Apparat geschädigt werden können. Ein derartiger Störfall hat das Leerfahren des gesamten Trockners mit anschließender Reinigung und den entsprechenden Ausfallzeiten beim Produktionseinsatz zur Folge. Im elektrotechnischen Sinn ist der Hochfrequenzgenerator eine durch Frequenz und Nutzleistung charakterisierte Energiequelle. Die sog. Anpassung dient dazu, unabhängig von den geometrischen Eigenschaften des Trockners die maximale Nennleistung des Generators unter Beibehaltung seiner normalen Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Dabei kann das Trocknungsgut als Kondensator der Kapazität C_T parallel zu einem Widerstand R_P

$$R_P = \frac{1}{\omega C_P \tan \delta} \quad (4)$$

aufgefaßt werden.

Infolge der Verdampfung des Wassers ändert sich der Verlustfaktor $\tan \delta$ und damit auch der, der Last entsprechende Widerstand R_P . Mit einem, dem Trockner vorgeschalteten verstellbaren Plattenkondensator wird der Lastwiderstand auf den für die Hochfrequenz richtigen Wert angepaßt und eine konstante Spannung zwischen der Elektrode eingehalten. Diese Anpassung ermöglicht die optimale Einstellung des Hochfrequenzfeldes und die sich ändernden Materialeigenschaften des Trocknungsgutes. Durch Variation einiger Parameter kann eine Anzahl unterschiedlicher Betriebszustände festgelegt werden, die einen direkten Einfluß auf das Trocknungsergebnis besitzen. Folgende Parameter können geändert werden:

- Spannung U und Strom I
- Bandgeschwindigkeit v , bzw. Verweilzeit τ
- Schichtdicke des Granulates d_2
- Elektrodenabstand d



$\Delta\theta$ Temperaturerhöhung in $^{\circ}\text{C}$
 c = spezifische Wärme
 Q = Erwärmungsenergie
 E_{10} = Effektivwert der el. Hochfrequenzfeldstärke
 E_f = Effektivwert der el. Hochfrequenzfeldstärke für Arbeitsfrequenz

$\tan \delta$ = Verlustfaktor
 ρ = spezifisches Gewicht
 t = Erwärmungszeit
 P_g = Wärmeleistung
 ϵ' = Dielektrizitätskonstante

Abb. 5: Diagramm nach Maddock zur Bestimmung der Einstelldaten eines Hochfrequenzgenerators

2.3 Veränderte Parameter und ihre Wechselwirkungen

Die Elektrodenspannung U und der Anodenstrom I als Maß für die Leistungsaufnahme bedingen einander. Dabei ist der Elektrodenabstand d und der Feuchtegehalt der Probe von Bedeutung, da bei gutem Dielektrikum, d.h. bei trockenem Gut die Spannung einen hohen Wert erreichen kann, ohne daß ein nennenswerter Stromfluß gemessen werden kann. Die Feldstärke als Maß für das Trockenpotential erreicht ihren maximalen Wert bei einem bestimmten Elektrodenabstand d , der innerhalb enger Grenzen eingehalten werden muß. Zur Vermeidung von Überschlügen, d.h. von Lichtbogen zwischen Elektrode und dem Trocknergehäuse als Masse, sollte eine Spannung von 200 V/mm Elektrodenabstand nicht überschritten werden. Der Schwingkreis mit dem variablen Elektrodenabstand, Kapazität des Anpassungskondensators und der Granulatschicht ist dann optimal eingestellt, wenn die Elektrodenspannung U und die Kapazität der Anpassung gleichzeitig maximal werden. Wenn die Primärfrequenz im Generator mit dem Abstimmbereich der Sekundärfrequenz im Arbeitskondensator übereinstimmt, kann mit Hilfe der Anpassung die gewünschte HF-Spannung und damit die Generatorüberbelastung eingestellt werden.

In Abbildung 6 ist die qualitative Resonanzkurve des Arbeitskreises dargestellt, die von der automatischen Regelung abgefahren wird. In Abhängigkeit des eingestellten Sollwertes, bzw. des Grenzwertes wird mit Hilfe der Regelung der kontinuierliche Betrieb dadurch gewährleistet, daß die Elektrodenspannung U_{el} als Maß für die Leistung den Prozeß steuert.

Gemäß der Gleichung (2) behält die Feldstärke E_d dann ihren Wert bei, wenn mit Vergrößerung des Elektrodenabstandes die Spannung steigt. Da aber aus Gründen der Bründendiffusion und der auslegungsbedingten Leistungsgrenze des Generators mit steigendem Elektrodenabstand nicht auch die Granulatschicht vergrößert werden kann, muß – wie in Abb. 3 zu sehen ist – die wachsende Elektrodendistanz durch einen Luftspalt

der Dicke d_1 aufgefangen werden. Nach Gleichung (3) reduziert d_1 die Feldstärke E_d . Im Bereich kleiner Distanzen kann dies durch Spannungserhöhung ausgeglichen werden, nicht aber bei größerem d_1 . Die Wirkleistung P des Hochfrequenztrockners kann nach Brüning /6/ wie folgt beschrieben werden:

$$P = U^2 \omega C \cdot \tan \delta$$

$$|P| = W \quad (5)$$

Dabei ist $\omega = 2\pi f$ mit der Frequenz f der speisenden Wechselspannung. Die Kapazität C des mit dem Trocknungsgut beschickten Arbeitskondensators errechnet sich nach

$$C = \frac{\epsilon' A_{HF}}{4\pi d \cdot 0,9} \cdot 10^{12} \text{ cm} \quad (6)$$

mit der vom Granulat eingenommenen Fläche A_{HF} senkrecht zu den Feldlinien. Die Werte für $\tan \delta$ und ϵ' sind durch die Materialeigenschaften des Granulates bestimmt. Gleichung (5) sagt aus, daß die vom Granulat aufgenommene Wirkleistung mit dem Quadrat der Elektrodenspannung wächst. Die obere Grenze ist durch die Grenzspannung zum Schutz vor Überschlägen festgelegt.

Durch die Leistungsgrenze des Generators wird die zu entfernende Feuchtigkeitsmenge pro Zeiteinheit und damit der maximale Durchsatz festgeschrieben. Die Transportleistung des Trockners kann entweder durch eine höhere Schichtdicke bei geringer Transportgeschwindigkeit oder durch eine niedrige Schichtdicke bei größerer Transportgeschwindigkeit erzielt werden. Wie der Versuch zeigt, führen beide Alternativen nicht zu dem gleichen Trocknungsergebnis, da Wärmeleit- und Brüddiffusionsprozesse in ihren Anteilen an der Trocknung nicht ähnlich kommutativ sind wie die Parameter eines Transportvorganges. Der Wärmetransport durch Diffusion verliert mit steigender Schichtdicke an Geschwindigkeit, während die Geschwindigkeit der Wärmebil-

derung durch die Hochfrequenz ihren Wert beibehält. Dadurch steigt die Temperatur im Granulat, je geringer die Geschwindigkeit der Wärmeabfuhr ist /49/.

2.4 Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Leistungsaufnahme und Elektrodenabstand

Jede Änderung der Dielektrizitätskonstante ϵ' erfordert eine Neueinstellung des Arbeitsschwingkreises, dessen Frequenz f sich mit der Dielektrizitätskonstanten verändert. Für die Versuche bedeutet das die individuelle Abstimmung des Arbeitsschwingkreises für jedes einzelne Trocknungsgut, d.h. für jeden Granulattyp. Dies betrifft jedoch nicht Feuchtmassen, deren Feststoffe wie z.B. Lactose, Stärke oder bestimmte Polymere in ihrer Beschaffenheit einander ähnlich sind, sich aber hinsichtlich ihres Feuchtegehaltes wesentlich voneinander unterscheiden. Der Feuchtegehalt besitzt nur einen Einfluß auf die Leistungsaufnahme. Der Arbeitsschwingkreis überträgt dann optimal Energie, wenn das Verhältnis d_2 zu d gegen 1 geht. Nach der Gleichung (3) ist der Zusammenhang zwischen der Wirkleistung P des Arbeitsschwingkreises, der spezifischen Dielektrizitätskonstante ϵ' , der Schwingfrequenz f_{HF} und dem Elektrodenabstand d bei konstanter Spannung U wie folgt:

$$P \sim \frac{f_{HF}}{d_2} \epsilon'_2 \quad (7)$$

Gemäß den Gleichungen (2), bzw. (3) teilt sich der Elektrodenabstand d in folgende Größen auf:

$$d = \epsilon'_2 \left(\frac{d_1}{\epsilon'_1} + \frac{d_2}{\epsilon'_2} \right) \quad (8)$$

Daraus wird ersichtlich, daß nicht P linear mit kleiner werdendem d

steigt. Die Elektrode und der sie umgebende Trockner stellen einen Plattenkondensator dar, dessen Kapazität bei Vorliegen einer einzigen, homogenen Dielektrikumsschicht sich nach Moeller und Fricke /9/ aus folgender Beziehung ergibt:

$$C = \frac{Q}{U} = \epsilon' \epsilon'_0 A_{HF} \frac{1}{d} \quad (9)$$

Setzt sich das Dielektrikum jedoch aus mehreren Schichten i zusammen, so kann man sich i Teilkondensatoren mit diskreten Kapazitäten C_i vorstellen, die in Reihe geschaltet sind. Die Einzelkapazität errechnet sich zu:

$$C_i = \epsilon'_i \epsilon'_0 A_{HF} \frac{1}{d_i} \quad (10)$$

Die Gesamtkapazität erhält man aus:

$$\frac{1}{C} = \sum_i^n \frac{1}{C_i} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Betrachtet man die Werte der Dielektrizitätszahl ϵ'_i von Luft und feuchtem Granulat und ihre Einflüsse auf E_d nach Gleichung (3), so kann ϵ'_{Luft} weitgehend vernachlässigt werden.

Die Dielektrizitätszahlen weisen folgende Werte auf:

ϵ' Wasser	= 70
ϵ' Luft	= 1
ϵ' Feuchtgranulat	= 5,0 - 12,5

Tab.1: Vergleich der Dielektrizitätskonstanten

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten wird deutlich, daß das Wasser selektiv von der Hochfrequenz angeregt wird.

während das trockene Granulat keine Leistung aufnimmt. Das bedeutet, daß nur Moleküle mit genügend hohem Dipolmoment im Hochfrequenzfeld erwärmt werden können /51/.

Die Dielektrizitätskonstante ϵ' bezeichnet einen Mittelwert der aus der Leistungsmessung bei kontinuierlichem Feeding errechnet wird. Dieser Wert ist eine Mischgröße aus den Dielektrizitätskonstanten des feuchten und des getrockneten Granulates. Ausgehend vom Feuchtgranulat bewegt sich die Dielektrizitätskonstante während der Trocknung auf die eines Isolierkörpers zu.

So kann Gleichung /8/ vereinfachend geschrieben werden:

$$d = \epsilon'_2 \left(d_1 + \frac{d_2}{\epsilon'_1} \right) = \epsilon'_2 d_1 + d_2 \quad (12)$$

Daraus folgt:

$$P = \frac{f \epsilon'_2}{(\epsilon'_2 d_1 + d_2)^2} = \frac{\epsilon'_2}{(\epsilon'_2 d_1 + d_2)^2} \quad (13)$$

Bei stationären Betriebsbedingungen des Trockners, d.h. einer konstanten Dielektrizitätskonstante ϵ'_2 kann weiter vereinfacht werden:

$$P = \frac{1}{\left(d_1 + \frac{d_2}{\epsilon'_2} \right)^2} \quad (14)$$

Bei konstantem ϵ'_2 und konstanter Schichtdicke d_2 kann durch Variation der Breite des Luftspaltes d_1 die relative Leistungsaufnahme ermittelt werden. Dazu wurden für d_1 und d_2 bestimmte Werte angenommen und bei festgehaltener Spannung in Gleichung (15) eingesetzt. Um $P = f(d_1)$ nach Gleichung (1) überprüfen zu können, wird ein Proportionalitätsfaktor J_1 definiert.

$$P = J_1 \frac{1}{\left(d_1 + \frac{d_2}{\epsilon'_2} \right)^2} \quad (15)$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle I zusammengefaßt.

Wird die für den jeweiligen Elektrodenabstand $d = d_1 + d_2$ maximale Spannung (200 V/mm) mit dem Elektrodenabstand verändert, so kann die Abhängigkeit der Leistungsaufnahme von der Größe des Luftspaltes $P = f(d_1)$ gemäß Gleichung (16) in Zahlen ausgedrückt werden:

$$P = J_2 \frac{U}{d} = J_2 \frac{U}{d_1^2 + 2d_1 \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_2^2}{\epsilon_2^2}} \quad (16)$$

Die daraus ermittelten Zahlenwerte sind in den Tabellen II - V enthalten. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen qualitativ die Wechselwirkungen $P = f(d_1)$.

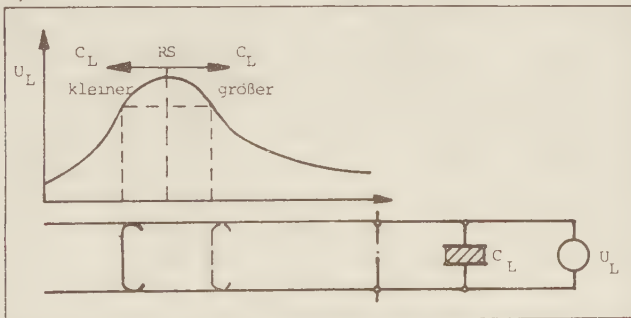


Abb.6: Resonanzkurve eines Arbeitskreises mit elektrotechnischer Schaltkurve

Um aus dem P -Wert die jeweilige Leistung zu ermitteln, müssen die Werte der in Gleichung (1) enthaltenen Konstanten mit dem P -Wert multipliziert werden. Bei Berechnung der Daten für die Tabelle IV und V wurde eine niedrige Dielektrizitätskonstante mit $\epsilon_2' = 9$ und Übernahme der anderen Variablen U und d_1 aus den vorhergehenden Tabellen gewählt.

Aus den Abbildungen 7 und 8 wird deutlich, daß für einen gegebenen Elektrodenabstand bei einer bestimmten Schichtdicke des Gutes die Leistung maximal wird. Das bedeutet, daß es einen optimalen Luftspalt gibt, bei

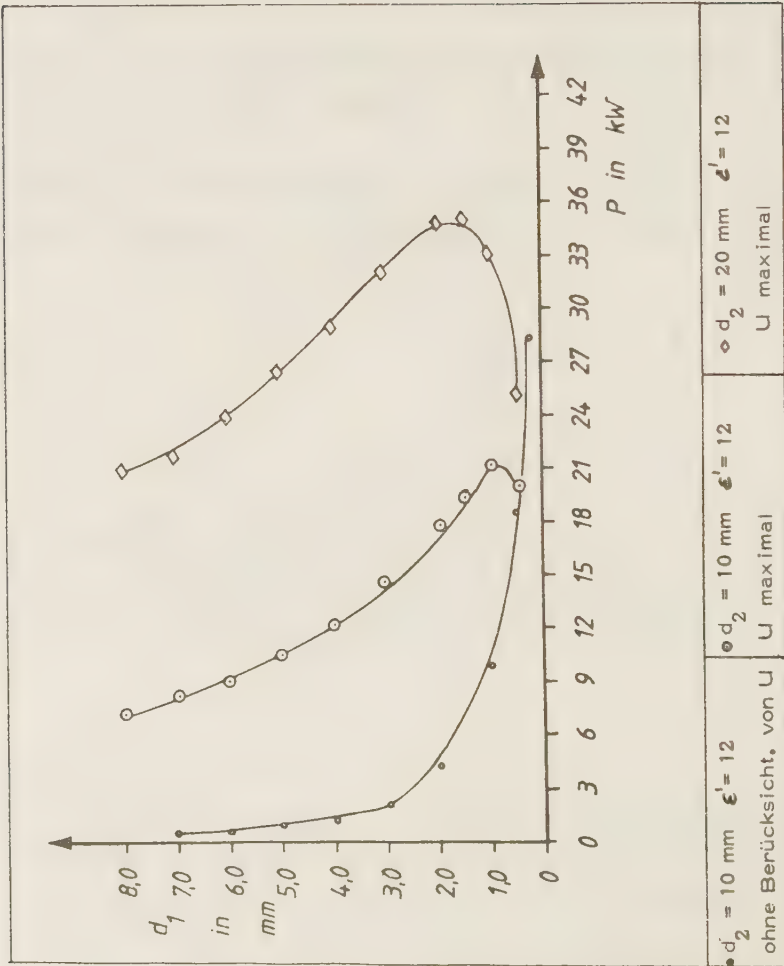


Abb. 7: Wechselwirkungen der Größe des Luftspaltes d_1 mit der Leistungsaufnahme

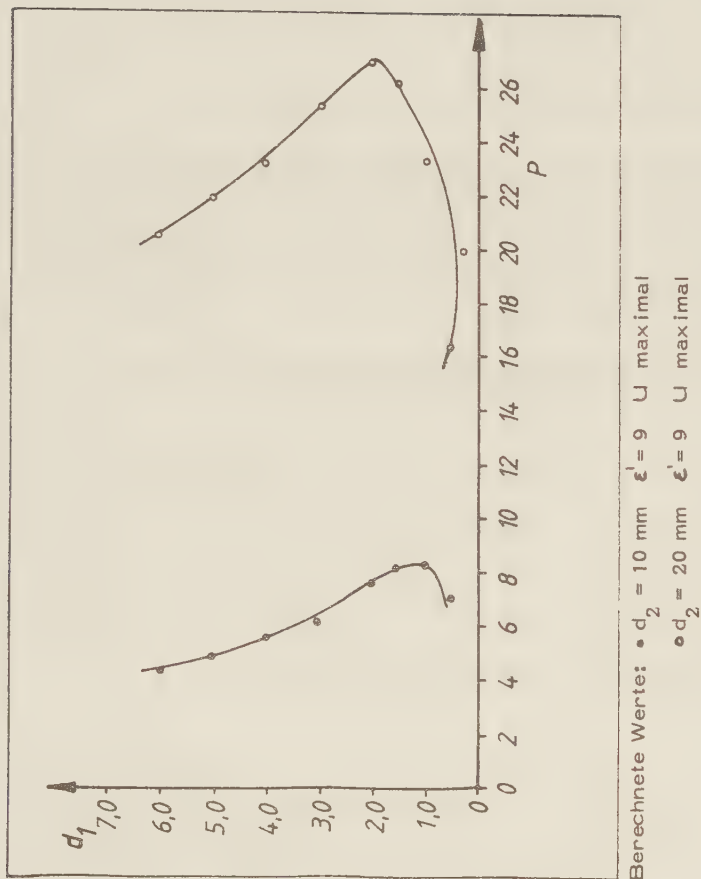


Abb. 8: Wechselwirkungen der Größe des Luftspaltes mit der Leistungsaufnahme

dem der Energieeintrag in das Feuchtgranulat seinen höchsten Wert erreicht. Die in den Darstellungen gezeigten Ergebnisse geben zunächst ein qualitatives Bild. Durch Einführung der vernachlässigten Faktoren kann man zu einer quantitativen Aussage kommen. Gleichung (17) kann wie folgt geschrieben werden:

$$P \approx \frac{U}{d} \cdot z \quad (17)$$

In den Werttabellen I - V wurde $z = 1$ gesetzt. Umgekehrt kann jedoch aus den Versuchen bei bekannter Schichtdicke, Elektrodenspannung und Frequenz sowie bei bekanntem Elektrodenabstand und Verlustfaktor $\tan \delta$ die Dielektrizitätskonstante des Gutes $\epsilon' = \epsilon'_2$ ermittelt werden.

2.5 Trocknungsverläufe bei der Hochfrequenztrochnung

Für jedes feuchte oder befeuchtete Material, das einer Trocknung unterzogen wird, kann man in Abhängigkeit des Trocknungsverfahrens einen Trocknungsverlauf angeben, der sowohl produktspezifisch als auch verfahrensspezifisch ist. In Abbildungen 9 sind zwei Trocknungsverläufe von Baumwollgeweben in zwei verschiedenen Trocknern dargestellt /10/. Die aus der Feuchteabnahme resultierende Kurve charakterisiert die verschiedenen Bindungen des Wasser an das Gut.

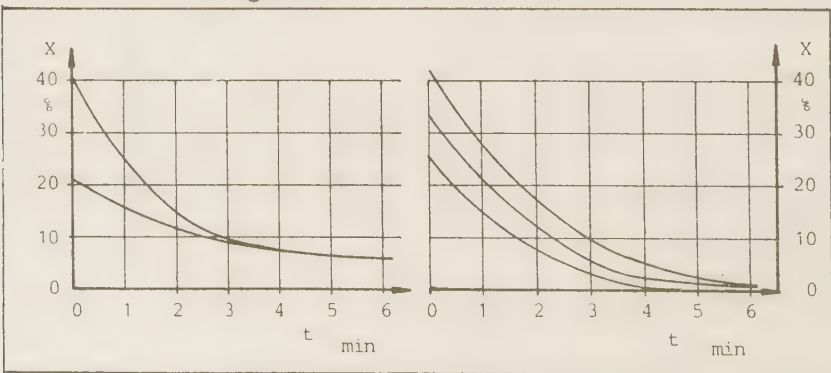


Abb. 9: Trocknung von Baumwollgeweben
a) im Hochfrequenzofen b) im Umluftofen

Im Bereich hoher Feuchten zu Beginn der Trocknung besitzt das Wasser eine adhäsive Bindung an das zu trocknende Material. Infolge der schwachen Bindekräfte kann es daher leicht getrocknet werden. Mit abnehmender Feuchte sinkt der Partialdruck des Wassers und die Wärmeleitfähigkeit im Gut nimmt zu. Gleichzeitig mit der geringer werdenden Zahl von Wassermolekülen reduziert sich das Potential an Molekülen, welche die Strahlenenergie des Hochfrequenzfeldes in Wärmeenergie transferieren können, d.h. es kann weniger Energie in das Gut eingebracht werden. In einer ersten Phase verdampft in kurzer Zeit ein großer Teil des Wassers, das als Oberflächenfeuchte gebunden ist. Die restliche Feuchte ist als Kapillarflüssigkeit im Granulat gebunden. Zu ihrer Verdampfung müssen wesentlich größere Energiemengen bereit gestellt werden als bei der Oberflächenfeuchte, da unterschiedliche Bindungskräfte überwunden werden müssen. Ein wesentlicher Vorteil der Hochfrequenz Trocknung besteht nun darin, daß die zur Verdampfung des Wassers im Gut notwendige Energie nicht durch Wärmeleitvorgänge von außen nach innen gebracht werden muß, wie beim Verfahren der konvektiven Trocknung.

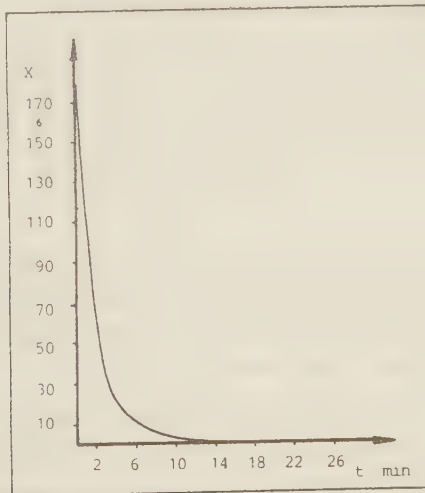


Abb.10: Hochfrequenz Trocknung von Spinnkuchen

Beim Hochfrequenzdurchlauf Trockner können zwei Zonen unterschieden werden:

1. Eine Erwärmungszone, in der das Wasser auf Siedetemperatur gebracht wird
2. Eine Verdampfungszone, in der vorwiegend die Verdampfung und damit die Abnahme der Feuchte bei nahezu konstanter Temperatur stattfindet /50/.

3 Theorie der Trocknung

3.1 Stoff- und Wärmetransport durchströmter Schüttungen

Ist ein Gut so feucht, daß seine ganze Oberfläche von einer zusammenhängenden Wasserhaut überzogen ist, so ist die Trocknungsgeschwindigkeit $\dot{m}_{D,I}$ nur von der Temperatur der Oberfläche und dem Stoffübergang abhängig. (1. Trocknungsabschnitt oder Oberflächenverdunstung) /57/. Liegt der Trocknungsspiegel in der Tiefe, so muß der Diffusionswiderstand der darüberliegenden Gutschicht überwunden werden (2. Trocknungsabschnitt). Je nach Trocknungsverlauf gehorcht der Trocknungsprozeß verschiedenen physikalischen Gesetzen, die durch die einzelnen Trocknungsabschnitte getrennt werden /52/.

Die Bründendiffusion innerhalb einer Granüle, bzw. innerhalb der gesamten Schüttung kann als innere Konvektion des Dampfes angesehen werden. Dabei strömt der Dampf entlang den Porenwänden bei konvektiver Trocknung entgegen, bei dielektrischer Trocknung mit dem Wärmestrom /14/.

Jeder Feuchtigkeitstransport in einem porösen System erfolgt in der Gasphase oder durch Oberflächendiffusion /15/. Wenn die Phasen innerhalb der Poren fein untereinander verteilt sind, kann das gesamte System bei einer makroskopischen Betrachtung einphasig angenommen werden. Der Vollständigkeit wegen werden im folgenden drei Bewegungsmodelle erörtert. Sind die Porenweiten klein gegenüber den freien Weglängen der Moleküle, ist für die Feuchtigkeitsbewegung das Gesetz der Knudsen'schen Molekularbewegung maßgebend.

Die allgemeine Bewegungsgleichung für die dampfförmige Phase lautet /11/:

$$\dot{M}_D = A_P \frac{b}{\mu_L} \frac{\Delta p}{s} \quad (18)$$

wobei für den Porenschnitt $A_P = \pi r^2$

Mit dem Bewegungsbeiwert nach Knudsen geht Gleichung (18) über in:

$$\dot{M}_D = A_P \left(\frac{b}{\mu_L} \right) \frac{\Delta p}{s} = A_P \epsilon \frac{\Delta p}{s} 0,584 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{D}{d_h} \quad (19)$$

wobei M_D die Molmasse des bewegten Dampfes und T die Temperatur in K bedeutet, d_h ist der hydraulische Durchmesser der Pore:

$$d_h = 4 V_p / O$$

Für Porenweiten, die größer als die freie Weglänge der Dampfmoleküle sind, ist das Stefansche Gesetz der Dampfdiffusion maßgebend. Die Bewegungsgleichung für die Diffusion in porösen Körpern ergibt sich zu:

$$\dot{M}_D = A \frac{\epsilon^2}{1,6} \frac{\Delta p}{s} b_{Diff} \quad (20)$$

Der Bewegungsbeiwert für die Diffusion ist mit R als der universellen Gaskonstanten

$$b_{Diff} = \frac{D}{RT} \cdot \frac{p}{p - p_{Dm}} \quad (21)$$

Bei Guttemperatur nahe dem Siedepunkt der Flüssigkeit unter dem je-

weiligen Druck geht die Diffusion in eine laminare Dampfströmung über, für welche das Hagen-Poiseuille-Gesetz gilt:

$$\dot{M}_D = A_P \frac{d_h^2 \rho \epsilon}{32 \eta} \frac{\Delta p}{s} \quad (22)$$

Da die Guttemperatur von 40°C nicht überschritten werden darf, hat die Verdampfung des Wassers bei niedrigen Temperaturen zu erfolgen. Neben den Diffusionsgesetzen von Knudsen und Stefan ist die Oberflächendiffusion /63/ zu betrachten. Sie beschreibt den Transportvorgang von Molekülen an Oberflächen in Richtung auf abnehmende Oberflächenbelegung. Oberflächen- und Gasphasendiffusion verlaufen parallel, wobei der Anteil der Oberflächendiffusion mit sinkenden Verdampfungstemperaturen ansteigt.

Satterfield gibt für die Rate der Oberflächendiffusion pro Flächeneinheit folgende Beziehung an:

$$M_D = \frac{-J_s}{\theta_s} \cdot \rho_s \cdot S \cdot \frac{dc_s}{dx} \quad (23)$$

mit

$$J_s = J_o e^{-E_A/RT} \quad (24)$$

Der Oberflächendiffusionskoeffizient J_s sinkt mit der Oberflächenbelegung. Die Aktivierungsenergie E_A beträgt die Hälfte der Energie physikalischer Absorption. Der Diffusionskoeffizient steigt mit steigender Temperatur.

3.2 Der erste Trocknungsabschnitt

Die spezifische Trocknungsgeschwindigkeit ist nach Kneule /12/ für plattenförmige Güter

$$\begin{aligned}\dot{m}_{D,1} &= - \frac{M_s}{O} \frac{d\Delta x}{dt} \\ &= - s \varrho \frac{d\Delta x}{dt}\end{aligned}\quad (25)$$

Durch Multiplikation beider Seiten der Gleichung mit der Schichtdicke s und anschließender Integration läßt sich die Trocknungszeit für die Oberflächenverdunstung berechnen:

$$t = - s^2 \int \frac{1}{\dot{m}_{D,s}} d\Delta x \quad (26)$$

Im ersten Trocknungsabschnitt kann $\dot{m}_{D,s} = \text{konst}$ gesetzt werden, sodaß gilt:

$$t = \frac{s \varrho}{\dot{m}_{D,1}} (X_o - X_{kn})$$

Dabei muß dem Feuchtgut Energie zugeführt werden, die sich wie folgt ergibt:

$$\begin{aligned}Q_{\text{tot}} &= Q + M_s (X_o - X_{kn}) \Delta H_v \\ &= \dot{V}_L c_{p_w} \Delta T + M_s (X_o - X_{kn}) \Delta H_v \\ &= (M_L c_{p_L} \Delta T + M_s (X_o - X_{kn}) c_{p_w} \Delta T + M_s (X_o - X_{kn}) \Delta H_v) \\ &\quad (\text{Trocknung überströmter ruhender Güter})\end{aligned}\quad (27)$$

Im ersten Trocknungsabschnitt verhalten sich gasdurchströmte Schüttungen an jeder beliebigen örtlichen Stelle des Trockners nach folgender Gleichung:

$$\dot{m}_{D,1} = \frac{a}{H_v} (T_L - T_o)$$

wobei a die Temperaturleitzahl ist,

Die mittlere spezifische Trocknungsgeschwindigkeit $\dot{m}_{Dm}$ des ersten Abschnittes ist

$$\dot{m}_{Dm} = \frac{\dot{M}_s (X_o - X_{kn})}{O \cdot t_I}$$

wobei für durchströmte Schüttungen

$$\begin{aligned} M_s &= V_{tot} (1 - \varepsilon) \rho \\ O &= V_{tot} \cdot \alpha \\ V_{tot} &= \text{Schüttvolumen} \end{aligned}$$

eingesetzt wird.

Im ersten Trocknungsabschnitt gehorcht also der Stoffübergang bei plattenförmigen Gütern ganz ähnlichen Gesetzen wie bei der Verdunstung über einer freien Wasserfläche.

3.3 Der zweite Trocknungsabschnitt

Der zweite Trocknungsabschnitt ist durch schwierig zu beschreibende Vorgänge charakterisiert, sodaß eine rechnerische Behandlung nur unter bestimmten vereinfachenden Voraussetzungen möglich wird.

Der Übergang vom ersten zum zweiten Trocknungsabschnitt ist durch einen Knick in der Trocknungskurve gekennzeichnet. Da der Trocknung im zweiten Abschnitt andere Gesetze als im ersten zugrunde liegen, ist die Kenntnis der Lage dieses Knickpunktes für eine genaue Beschreibung des Trocknungsverlaufes sehr wichtig /47/.

$$\dot{m}_{D, kn} = f (X_{kn} / X_o; X_o; T)$$

Im zweiten Trocknungsabschnitt findet keine Oberflächenverdunstung mehr statt. Die Verdunstungsstellen, deren Gesamtheit den sog. Trocknungsspiegel darstellt, ziehen sich vermehrt in das Gutinnere zurück. Nach dem Knickpunkt ist die Trocknungsgeschwindigkeit an verschiedenen Stellen der mittleren Feuchtigkeitsdifferenz proportional:

$$\dot{m}_{D, II} = \frac{\Delta M_s (X_o - X_m)}{O t_{kn}} \quad (29)$$

Die beste Methode, die jeweilige Trocknungsgeschwindigkeit des zweiten Abschnittes darzustellen geht davon aus, daß die Geschwindigkeit des 1. Abschnittes und die Endtrocknungsgeschwindigkeit bekannt sind. Aus ihrer Differenz wird die Geschwindigkeit des 2. Abschnittes ermittelt.

In Analogie zur Fourierschen Differentialgleichung der Wärmeleitung ergibt sich für die zeitliche Abnahme der Feuchtigkeit im 2. Trocknungsabschnitt

$$\frac{dX}{dt} = - D \left(\frac{\pi}{s} \right)^2 \cdot C (X_o - X_E) \quad (30)$$

D ist dabei der Diffusionskoeffizient und C eine, vom Feuchtigkeitsgehalt des Gutes unabhängige Konstante.

Anders als bei der konvektiven Trocknung bedient sich die Hochfrequenz-trocknung nicht der Luft als Medium für die Wärmeübertragung. Jedoch sind die Temperaturen des entstehenden Dampfes die Lufttemperatur und die sich einstellende Gleichgewichtstemperatur von großer Bedeutung. Die notwendige Verdampfungsenthalpie wird durch die Hochfrequenz eingespeist. Folgende Wärme- und Stoffbilanzen kann um eine infinitesimale Wärmequelle (bei Hochfrequenz: Wasser) gelegt werden /17/:

$$(\dot{Q}_W + \dot{m} \Delta H_V) - \dot{Q}_{Gr} - \dot{Q}_{konv} = \dot{m}_V \Delta H_V \quad T = T_{Gr} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_W c_p \Delta T + \dot{m}_W \Delta H_V \quad T = T_V - \dot{m}_{Gr} c_p (T_V - T_{Gr}) - \\ - \alpha (T_{Gr} - T_L) = \dot{m}_V \Delta H_V \end{aligned}$$

Die Masse des aus dem Gut herausverdampften Wassers ist proportional dem Dampfdruck bei der entsprechenden Granulattemperatur und kann wie folgt näherungsweise berechnet werden /18/:

$$\dot{m}_V = \frac{p_D}{p} \cdot \frac{\dot{m}_L}{M_L} \cdot \frac{M_W}{\left(1 - \frac{p_D}{p}\right)} \quad (32)$$

Wenngleich nach Perkin /19/ die Temperatur des Wassers rasch den Siedepunkt erreicht, bleibt die Trocknung von Granulaten mit Hochfrequenz eine Verdunstungstrocknung, wobei der Dampfdruck der verdampfenden Flüssigkeit deutlich unter der Höhe des Gesamtdruckes gelegen ist.

4 Trocknungsversuche

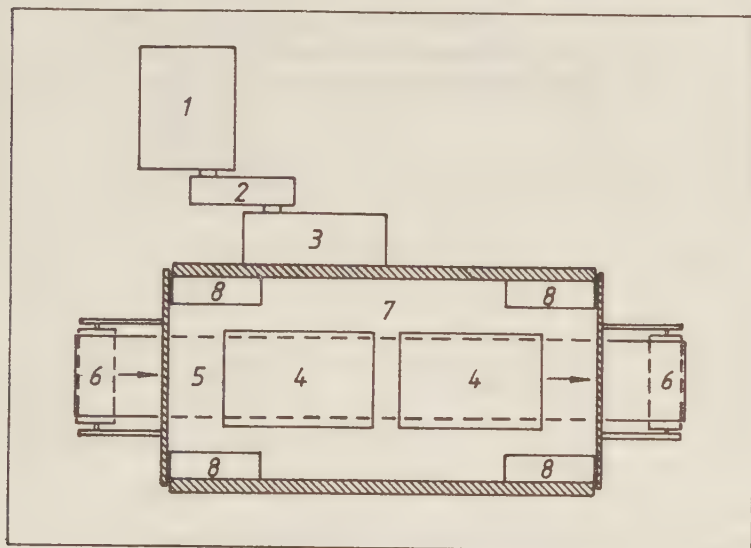
Über erfolgreiche Trocknungsversuche im Hochfrequenzfeld mit pharmazeutischem Gut berichteten bereits Schepky, Travers und Felber. Trotz der vielversprechenden Ergebnisse hat sich die Hochfrequenz Trocknung bis heute weder in der Pharma- noch in der Lebensmittelindustrie durchgesetzt. Verschiedene Patente wurden formuliert und vergeben, die den Einsatz der Hochfrequenz zur Trocknung temperaturempfindlicher Güter empfahlen /48/, doch blieb die Nutzung dieser Technologie in ihren Anfängen stecken. Lediglich in der Textil- und Holz Trocknung sowie in der Holzverleimung konnte die Hochfrequenztechnik Fuß fassen. Daher

war der Trockner, auf dem die ersten Versuche dieser Arbeit gefahren wurden, für den Einsatz bei der Garn- und Holz Trocknung ausgelegt.

4.1 Versuchsanlage I

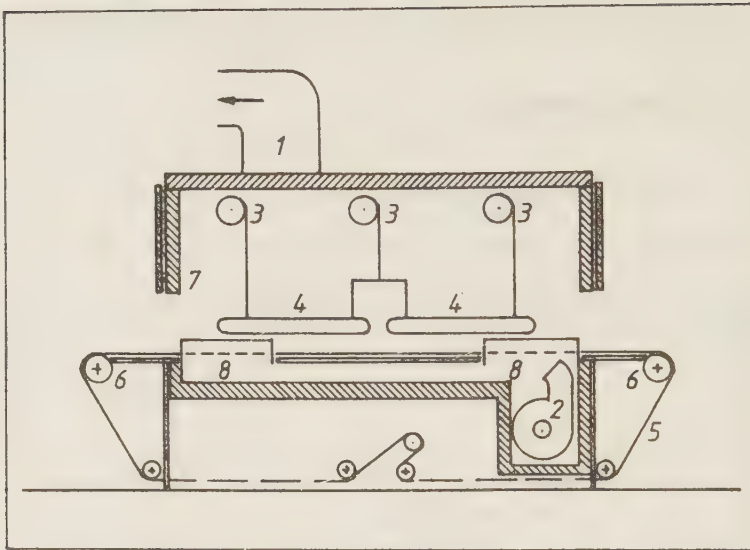
4.1.1 Beschreibung der Anlage

In den Abbildungen 12 und 13 wird der Trockner in der Aufsicht und der Seitenansicht als Schemazeichnung dargestellt.



- 1 Generator (Hochfrequenz)
- 2 Hochfrequenz - Einspeisung
- 3 Hochfrequenz - Anpassung
- 4 Elektroden
- 5 Transportband
- 6 Umlenkrollen für Transportband
- 7 Trocknergehäuse
- 8 Zuluftkanäle

Abb. 11: Draufsicht (Schnitt) auf Versuchsanlage I



- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1 Abluftkanal | 5 Transportband |
| 2 Zuluftventilator | 6 Umlenkrollen für Transportband |
| 3 Elektrodenhöhenverstellung | 7 Gehäuse des Trockners |
| 4 Elektroden | 8 Zuluftkanäle |

Abb. 12: Seitenansicht (Schnitt) von Versuchsanlage I

Der Transport des Trocknungsgutes erfolgte auf dem Band, auf das vor Eintritt in den Trocknungskanal das feuchte Granulat dosiert und bei Verlassen durch einen Abstreifer an der Umlenkwalze abgenommen wurde. Das Gut passierte das Hochfrequenzfeld in einem Quasi-Festbett, d.h. die Masse wurde auf dem Band weder umgewälzt noch aufgelockert. Zwischen der Gutoberfläche und der Elektrode wurde quer zur Transportrichtung ein Luftstrom geführt, der vorgewärmt wurde und zur Abführung der Brüden diente.

Durch Variation der folgenden Parameter kann eine Anzahl unterschied-

licher Betriebszustände eingestellt werden:

- Spannung U und Strom I
- Bandgeschwindigkeit v , bzw. Verweilzeit
- Schichtdicke des Granulates d_2
- Elektrodenabstand d

4.1.2 Versuchsdaten

4.1.2.1 Beschaffenheit des Trocknungsgutes

Granulate unterschiedlicher Zusammensetzung und Herstellungsweise wurden ausgewählt, um das Verhalten bei der Trocknung zu untersuchen. In Tabelle 1 sind die Granulate und ihre Unterscheidungsmerkmale einander gegenübergestellt.

Präparat	Ausgangs- feuchte	Bindemittel	Bindemittel- anteil	Granu- lator	Korn- größe max.
	x_A $\eta\%$		$\eta\%$		d_k mm
A	16,0	Polyvinyl- pyrrolidon	4,0	RS	3,0
B	14,0	Gelatine	3,1	SM	4,0
C	10,0	Polyvinyl- pyrrolidon	4,3	RS	3,0
D	12,8	Maisstärke	1,8	SM	4,0
RS = Reibschneider SM = Siebmaschine					

Tabelle 1: Trocknungsrelevante Unterscheidungsmerkmale der an Versuchsanlage I verwendeten Granulate

Zu den Unterscheidungsmerkmalen gehören der Bindemittelanteil, die Ausgangsfeuchte, die Art des Bindemittels und die von ihm ausgehenden Kräfte, die Verdichtung im Granulator und die durch Verwendung des jeweiligen Siebeinsatzes erzielte Korngröße der Granülen.

Die in o. a. Tabelle aufgeführte Ausgangsfeuchte X_A bezieht sich nur auf die beim Befeuchten zugeführte Flüssigkeitsmenge, während die im Rohstoff enthaltene Quellfeuchte bei diesem Wert nicht berücksichtigt ist.

Die oben beschriebenen Präparate enthalten einen Wirkstoff nur in niedriger Dosierung von 1 - 2%, d. h. 98 - 99% der Gesamtmasse bestehen aus sog. Tablettierhilfsstoffen, die vorwiegend nativen Ursprungs sind und entsprechend den in der Pharmazie notwendigen Reinheitsanforderungen aus dem Naturprodukt aufgearbeitet werden. Sie enthalten dabei bis zu 8% Wasser als Quellfeuchte, die weder im industriellen Trocknungsprozeß noch in der analytischen Bestimmung des Trocknungsverlustes im Trockenschrank weggetrocknet wird. Die Ermittlung des Wassergehaltes erfolgt bei allen Versuchen gemäß einer Konventionsmethode, die den Trocknungsvorgang bei 105°C und 1 Stunde Verweildauer in einem belüfteten Trockenschrank vorsieht.

Die o. a. Granulate sind sog. Klebstoffgranulate, bei denen ein Bindemittel die Adhäsionskräfte zwischen den Pulverpartikeln zur Erhaltung der Granulatstruktur erzeugt /29/.

Die Porosität der Agglomerate hängt von der Menge der Granulierflüssigkeit, von der Art und Konzentration des Bindemittels und der Intensität und Dauer der Verdichtung ab. Es existiert ein optimaler Flüssigkeitsanteil, bei dem sich größere und stabilere Granülen bilden.

Im getrockneten Zustand hängt die mechanische Stabilität von der Verdichtung bei der Granulation und von der Bindemittelkonzentration ab. Auf den Einfluß der Porosität auf Trocknung und Trocknungsgeschwindigkeit wird später noch eingegangen.

4.1.2.2 Trocknungsergebnisse und apparative Daten

Die Versuche an Versuchsanlage I galten dem Ziel, die Betriebsbereiche

der Parameter Spannung, Leistung, Elektrodenabstand und Bandgeschwindigkeit herauszufinden. Die Zielgröße war der geforderte Wert des Restfeuchtegehaltes des jeweiligen Granulates. Jedem Versuch, bzw. jeder Versuchsreihe ging ein Vorversuch voraus, der die optimale Einstellung der Parameter im vorgewählten Kennfeld erbrachte. Erst nach Einstellung des stationären Zustandes begannen die Aufzeichnungen der Versuchsdaten- und ergebnisse. In Tabelle 2 sind einige Versuche aufgeführt, deren Einstellung repräsentative und reproduzierbare Werte widerspiegeln und deren Aussagekraft in wiederkehrenden Versuchen bestätigt wurde.

Um die Anzahl der Parameter zu reduzieren wird ein Wirkungsgrad definiert.

$$\eta = \frac{\dot{V}_G \rho_s (x_o - x_E) \Delta H_V}{P} \quad (33)$$

Für die Verdampfungsenthalpie ΔH_V wird der Wert für reines Wasser bei einer Verdampfungstemperatur angenommen, die der mittleren Granulattemperatur während des Aufenthaltes im Hochfrequenzfeld entspricht. Nach den Tabellen VI und VII beträgt die mittlere Temperatur des Granulates $T_G = 53^\circ\text{C}$. In den Versuchen wurde die mittlere Granulattemperatur als weitgehend konstant gefunden. Für den Volumenstrom des Granulates gelten folgende Beziehungen:

$$\dot{V} = L B d_2 \frac{1}{\tau} \quad (34)$$

L bezeichnet dabei die Länge der sich unter den Elektroden befindlichen Schüttung, B die Breite der Schüttung auf dem Band. Folgende Werte können für beide Größen eingesetzt werden: $L = 2400 \text{ mm}$, $B = 500 \text{ mm}$. Damit ergibt sich für die Fläche unter dem Hochfrequenzfeld: $A = 1,20 \text{ m}^2$. Schwierig gestaltete sich die Messung von Leistung und Spannung, da diese Werte stark von der Schichtdicke d_2 des Granulates auf dem Band abhängen. Diese variiert in einem Bereich von $\pm 5 \text{ mm}$ und erzeugte

Präparat	P _{H-F} kW	U _{H-F} kV	d ₂ mm	τ _{H-F} s	X _O Gew. %	X _E Gew. %	X _{N₂O} Gew. %	η	Wirkstoff
A	8,0	3,2	12	330	15,0	1,4	1,9	0,6	Anaesthesin
A	7,5	3,2	12	265	15,0	2,2	1,9	0,7	Anaesthesin
A	8,0	2,8	12	265	15,0	1,8	1,9	0,7	Anaesthesin
A	8,0	2,9	12	330	15,0	1,9	1,9	0,5	Anaesthesin
A	7,0	3,0	12	330	15,0	1,6	1,9	0,7	Ergotalkaloid
A	7,0	3,0	12	330	15,0	2,0	1,9	0,7	Ergotalkaloid
B	7,0	2,8	9	220	12,2	0,5	1,2	0,7	Anaesthesin
B	5,0	3,0	5	188	12,2	0,5	1,2	0,5	Anaesthesin
B	5,0	3,0	6	132	12,2	1,0	1,2	0,9	Anaesthesin
B	5,0	3,0	6	188	12,2	2,5	1,2	0,6	Anaesthesin
C	7,0	3,0	8	132	9,1	0,7	1,3	0,7	Anaesthesin
C	5,0	3,0	5	146	9,1	0,8	1,3	0,5	Anaesthesin
C	5,5	3,0	5	120	9,1	0,8	1,3	0,6	Anaesthesin
D	7,0	3,0	8	188	12,8	2,7	2,8	0,6	Anaesthesin
D	5,0	3,0	5	146	12,8	2,6	2,8	0,7	Anaesthesin

Tabelle 2: Trocknungsergebnisse und apparative Daten

damit wechselnde Signale an den Spannungs- und Leistungsmessgeräten. Die Übertragung der Schichtdickenänderung auf die elektrischen Meßgrößen ist darauf zurückzuführen, daß bei höherer Schichtdicke im Hochfrequenzfeld eine höhere Leistungsaufnahme und damit eine höhere Elektrodenspannung durch die größere Masse an Wasser verursacht wird. Die Eigenregelung liegt in der Änderung des Dielektrikums zwischen den Elektroden begründet. Da aber eine kontinuierliche Schichtdickenmessung des Granulates auf dem Band nicht möglich war, konnte keine gesicherte Korrelation zwischen der aktuellen Schichtdicke d_2 und der Spannungs-, bzw. Leistungsanzeige gegeben werden. Es wurde beobachtet, daß das Spannungssignal bei Veränderung der Schichtdicke nicht sofort mit Eintritt der veränderten Schichtdicke in das HF-Feld reagiert, sondern "verschmiert", d.h. bei Erhöhung von d_2 steigt die Spannung an, um dann mit zunehmend im HF-Feld zurückgelegter Strecke infolge der Verdampfung zu fallen. In Tabelle 2 sind daher nur die Werte aufgelistet, bei denen eine Probeentnahme während des Versuches vorgenommen wurde, d.h. nach Stabilisierung aller Einflußgrößen. Der unterschiedliche Gehalt des Granulates an Wasser wirkt sich auf die Dichte der Schüttung aus. Das muß bei der Berechnung des Wirkungsgrades berücksichtigt werden. In Tabelle 3 sind die Meßwerte für die Schüttdichten der feuchten und getrockneten Granulate aufgelistet.

Granulattyp	Schüttdichte		
	feucht kg/dm ³	trocken kg/dm ³	mittlere kg/dm ³
A	0,588	0,555	0,565
C	0,572	0,550	0,560
E	0,549	0,510	0,520

Tabelle 3: Schüttdichten der bei den Versuchen verwendeten Granulate

Unter der Annahme, daß die Dichte über die Länge des Trockners analog zum Trocknungsverlauf exponentiell abnimmt, wurde die mittlere Dichte ermittelt.

Die Verdampfungsenthalpie wurde einer Verdampfungstemperatur von 70°C entsprechend zu $\Delta H_V = 2310 \text{ kJ/kg}$ angesetzt. Als Größe P_{HF} wurde ausschließlich die an der Elektrode gemessene Leistung eingesetzt, d.h. die Leistung der Hilfsantriebe sowie die Blindleistung des Generators wurde nicht berücksichtigt. Diese Annahmen liegen der Berechnung des Wirkungsgrades nach Gleichung (31) zugrunde.

In den ersten Versuchen wurde der Trocknungsverlauf bei einer hohen Schichtdicke und langer Verweilzeit verfolgt. Dabei konnte ein befriedigendes Trocknungsergebnis erzielt werden. Jedoch war die Erwärmung des Granulates zu hoch. Mit steigender Schichtdicke wuchsen Spannung und Strom und damit die Granulattemperatur, weil infolge der hohen Schichtdicke nicht alles verdampfte Wasser aus dem Gut entweichen und in die Umgebung abtransportiert werden konnte. Das ist dadurch zu erklären, daß zwar das Wasser im Granulat schnell in die Gasphase übergeht, der geschwindigkeitslimitierende Schritt jedoch in dem Transport des Dampfes aus dem Festbett besteht. Der nicht entweichende Dampf absorbiert Energie aus dem Hochfrequenzfeld. Mit der steigenden inneren Energie und der mit der Temperatur anwachsenden kinetischen Energie der Wassermoleküle erhöht sich der Energie-, d.h. Wärmehalt. Dadurch verändert sich auch das Dielektrikum, dessen Leitfähigkeit zunimmt. Diese Vorgänge sind insbesondere dort zu beachten, wo infolge stärkerer Verdichtung des Granulates Sekundäragglomerate in Kugelform vorhanden sind. Bei diesen Gebilden ist der Diffusionswiderstand, aber auch die Feuchtigkeitsdichte, d.h. die Konzentration des Wassers pro Volumenelement größer als beim übrigen Material. In Abbildung 13 sind die gemessenen Granulattemperaturen als Funktion der Schichtdicke aufgetragen. Aus Abbildung 13 wird deutlich, daß die Granulattemperatur exponentiell mit der Schichtdicke ansteigt. Bei diesen Versuchen wurde die Schüttung nicht von Luft durchströmt, sondern wurde als Festbett durch das Hochfrequenzfeld transportiert. Die Meßinstrumente registrierten

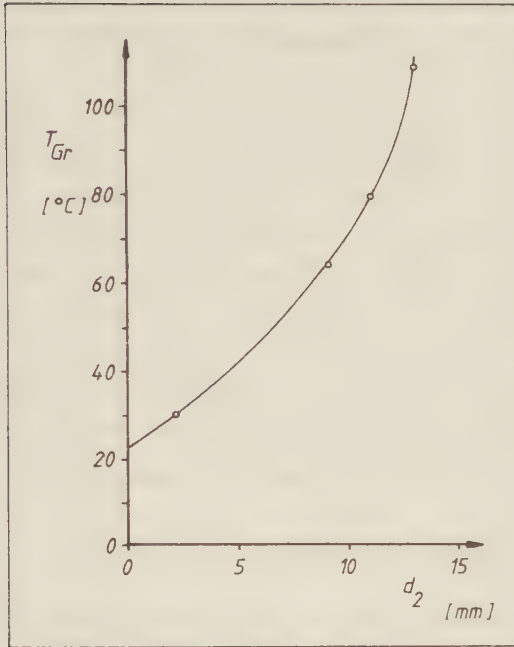


Abb. 13: Temperaturen im Granulat als Funktion der Schichtdicke des Granulates

eine hohe Spannung bei großer Leistungsaufnahme die aber kein gutes Trocknungsergebnis zur Folge hatte. Innerhalb der Schüttung entstehen Temperaturen von 100°C . Bezirke der Schüttung weisen nach Verlassen des Hochfrequenzfeldes eine hohe mechanische Festigkeit auf, die mit dem feuchtheißen Zustand und einer dabei vor sich gehenden Sinterung erklärt werden können.

4.1.2.3 Einflüsse auf thermolabile Wirkstoffe

Für die Versuche wurden Granulate mit homogen verteilten thermolabilen Wirkstoffen eingesetzt. Die Temperaturmessung des Granulates gestaltete sich sehr schwierig, da Thermoelemente ebenso wie Flüssig-

Präparat	X_o	d_2	Meßhöhe über Band	T_{Prod}	X_E	Wirkstoff- gehalt
	%	mm	mm	°C	%	% des theor. Wertes
A	17,1	12	3	80	4,3	81,8
	17,1	12	9	65	3,6	100,4
	17,1	9	3	68	2,4	98,8
	17,1	9	7	58	1,3	101,4
B	12,6	9	1-9	-	0,5	90,9
	12,6	6	1-6	-	1,0	97,6
C	9,2	7	3	70	0,7	96,0
	9,2	7	6	60	0,7	-
	9,2	5	4	60	0,8	97,3
	9,2	5	2	60	0,8	-
D	14,3	7	1-7	-	2,7	100,8
	14,3	5	1-5	-	2,6	98,0

Tabelle 4: Vergleich der chemischen und physikalischen Daten von Granulaten nach der Trocknung

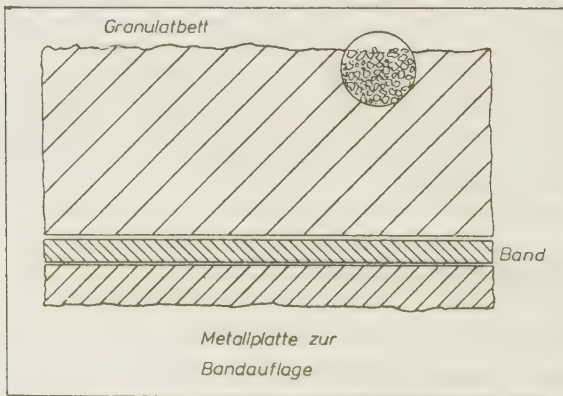


Abb. 14: Darstellung der Granulatschüttung auf dem Band

keitsthermometer oder Temperaturmeßstreifen innerhalb des Hochfrequenzfeldes keine zuverlässige "Angabe" machten. Deshalb wurde die Temperatur dabei auf diese Weise ermittelt: nach Erreichen eines stationären Betriebes wurde das Hochfrequenzfeld abgeschaltet. Der Bandabschnitt, der sich bei Abschalten der Hochfrequenz unter den Elektroden befunden hatte, wurde aus dem abgeschirmten, HF - dichten Trockner mit hoher Bandgeschwindigkeit herausgefahren. Die Messungen zur Temperaturverteilung und die Probenahme zur Untersuchung des Wirkstoffabbaues in Abhängigkeit von Temperatur, Schichtdicke und Restfeuchte wurde unmittelbar vorgenommen. Die Temperatur wurde mit einem Thermoelement am Grund der Granulatschüttung und an deren Oberfläche ermittelt. An gleicher Stelle wurden die Proben an Granulat gezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

4.1.2.4 Temperatur und Feuchte in Wechselwirkung mit dem Wirkstoff

Die Schüttung auf dem Transportband, die weder durch Luft noch durch eine Rüttelbewegung aufgelockert wurde, hatte einen Temperaturgradienten. Die Temperatur am Boden war höher als an der Oberfläche der Schüttung. Mit zunehmender Höhe der Schüttung nahm die Temperatur sowohl am Boden als auch an der Oberfläche zu. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, daß der Wirkstoff mit steigender Temperatur zunehmend geschädigt wird. Die Tabelle VI und VII geben Auskunft über die Temperaturverteilung im Gut über die gesamte Durchlaufstrecke. In den Abbildungen 15 und 16 sind die gemessenen Granulattemperaturen über die Länge des Hochfrequenzfeldes (Länge der Elektroden) aufgetragen. Aus den Abbildungen 12 und 13 ist bekannt, daß der Apparat über zwei miteinander verbundene, also elektrisch aneinander gekoppelte Einzelelektroden verfügt. Weiterhin sind in Abb.15 und 16 der Feuchtegehalt in Gew.-% und der Gehalt an Wirkstoffen in Prozent des theoretischen Wertes eingezeichnet. In Tabelle 5 ist die Abnahme des Wirkstoffgehaltes in Abhängigkeit von der Länge des Hochfrequenzfeldes zusammengestellt.

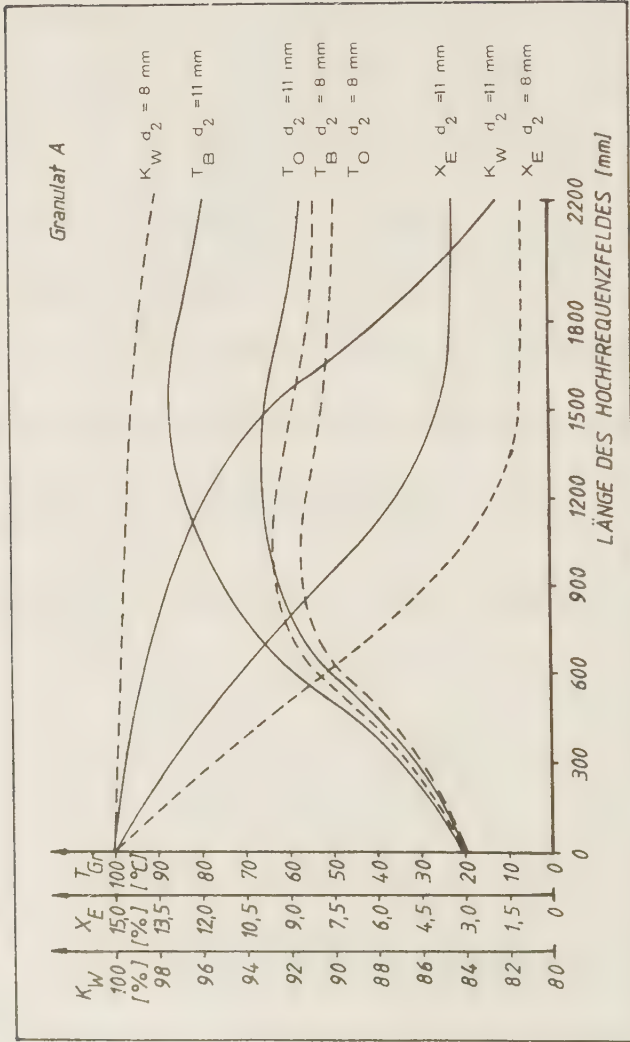


Abb. 15: Temperatur-, Feuchte- und Wirkstoffverteilung für ein differentielles Granulatvolumenelement während der Verweilzeit im Hochfrequenzfeld (K_W = Gehalt an Wirkstoff, $T_{B,0}$ = Temperatur am Boden, bzw. an der Oberfläche, X_E = Feuchtegehalt im Granulat)

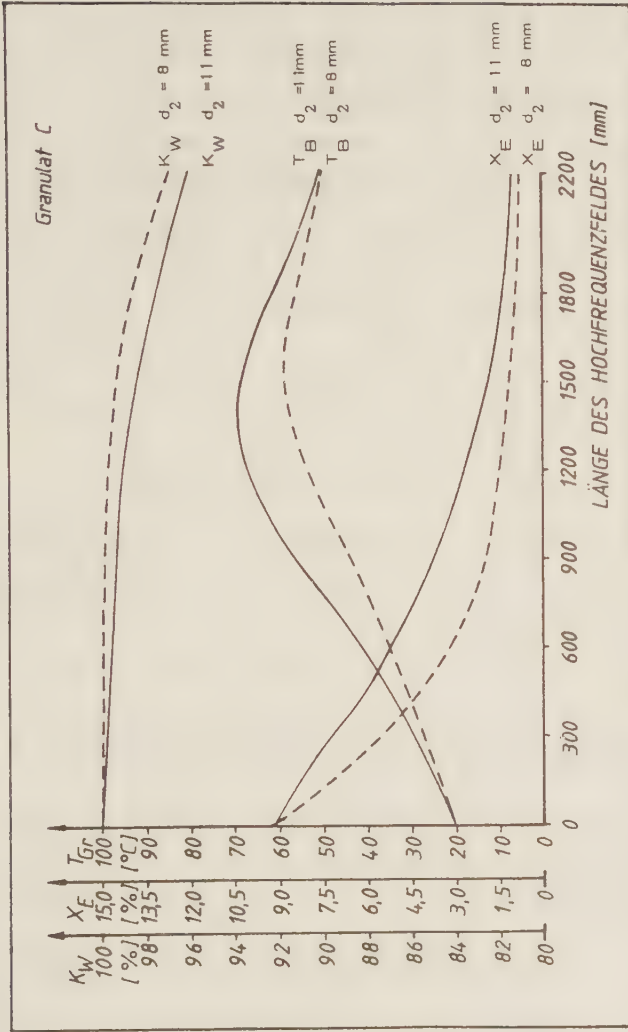


Abb. 16: Temperatur-, Feuchte- und Wirkstoffverteilung für ein differentielles Granulatvolumenelement während der Verweilzeit im Hochfrequenzfeld

Die Proben zur Ermittlung des Wirkstoffgehaltes wurden der Mitte einer 12 mm Schicht auf dem Band entnommen.

Laufstrecke unter der Elektrode in mm	0	300	600	900	1200	1500	1800	2130
Wirkstoffgehalt in %	100	100,1	96,2	97,1	91,6	86,4	83,7	81,8

Tabelle 5: Verteilung des Wirkstoffgehaltes im Bett

Präparat A, Schichtdicke $d_2 = 12$ mm, Probennahme in Schichtmitte, $n = 3$, Bandgeschwindigkeit $v_{\text{Band}} = 0,5$ m/min
real, Verweilzeit $\tau = 265$ sec

Aus Abbildung 15 geht hervor, daß der Wirkstoffgehalt – als das wesentliche Qualitätsmerkmal in der Pharmazie – dann seine größte Schädigung erfährt, wenn die Temperatur und die Feuchte im Gut maximal sind. Abbildung 15 zeigt, daß für die verwendete Versuchsanlage die Wärme- und Brüdenabführung nicht ausreicht, um ein Granulat mit hoher Ausgangsfeuchte X bei hohen Schichtdicken auf dem Band die Trocknung ohne Schädigung des Wirkstoffes durchzuführen. In Abbildung 16 sind die Werte für Präparat C bei gleichen Versuchsbedingungen dargestellt. Die Ausgangsfeuchte beträgt 9,0 Gew. % bis 10,0 Gew. %. Wenngleich die Ausgangsfeuchte im Vergleich zu der von Präparat A erheblich geringer ist, wird ein qualitativ ähnlicher Trocknungsverlauf beobachtet. Auch hier ist das Trocknungsergebnis bei hohen Schichtdicken d_2 unbefriedigend. Obwohl die Selbstregelung der Hochfrequenzanlage bei einem höheren Feuchtegehalt eine höhere Energiedichte zwischen den Elektroden erzeugt, kann die Restfeuchte nicht auf den gewünschten Wert zurückgeführt werden. Die ins Gut eingebrachte Energie steigert daher we-

sentlich die Temperatur des Produktes, ohne daß die Feuchte in genügendem Maß entweichen kann.

Wie beim konvektiven Wirbelschichttrockner ist der Wasserdampftransport bei der HF-Trocknung der limitierende Teilschritt des Trocknungsprozesses. Das Produkt fällt nur dann trocken und ohne Wirkstoffverluste an, wenn die Wärme in dem Maße abgeführt wird, wie sie im Gut entsteht, d.h. die pro Volumeneinheit erzeugte Wärme muß in der gleichen Geschwindigkeit dem Gut entzogen werden, mit der sie entstanden ist. Die optimale Einstellung des Prozesses ist dann erreicht, wenn die Zunahme der Enthalpie ΔH des Granulates gegen 0 geht und der Massenstrom des Wasserdampfes maximal wird. Daraus wird deutlich, daß der Zustand des Wirkstoffes in doppelter Weise vom Feuchtigkeitsgrad des Granulates abhängt:

1. Mit steigendem Wassergehalt tritt - auch bei Raumtemperatur - Hydrolyse ein, die den Arzneistoff zersetzt. Dieser Vorgang steigt exponentiell mit dem Temperaturanstieg an.
2. Je schlechter die Brüdenabfuhr ist, desto feuchter und wärmer verläßt das Granulat das Volumenelement i , um in das Volumenelement $i + 1$ überzutreten. Dabei zersetzt sich der Wirkstoff mit zunehmender Geschwindigkeit.

4.1.2.5 Trocknungsgeschwindigkeit und Temperaturgradienten

In den folgenden Abbildungen 17 und 18 sind die Trocknungsgeschwindigkeiten und die Änderungsgeschwindigkeit der Granulattemperatur über der Verweilzeit aufgetragen. Die Trocknungsluft überströmt das auf dem Band liegende Gut mit Raumtemperatur. Dabei nimmt sie die aus dem Granulat aufsteigenden Brüden auf und führt sie ab.

Der Feuchtigkeitsgehalt und die Temperatur wurden in der Mitte der Granulatschicht gemessen. Der Trocknungsvorgang setzt sofort bei Eintritt des Gutes in das Hochfrequenzfeld ein, gleichzeitig steigt die Tempera-

tur in der Schüttung. Dabei eilt die Geschwindigkeit der Temperaturänderung der Trocknungsgeschwindigkeit voraus, sodaß ihr Maximum bereits überschritten ist, wenn die Abnahme der Feuchtigkeit ihren maximalen Wert erreicht (bei der höchsten Temperatur). Der schnelle Anstieg der Temperatur ist auf die sofort einsetzende Erwärmung im Granulat zurückzuführen, während die Trocknung durch Diffusionsvorgänge verzögert wird. Nach Überschreiten des Maximums fällt die Trocknungsgeschwindigkeit exponentiell ab, da bei kleiner werdendem Feuchtegehalt das Potential für die Leistungsaufnahme sinkt. Daher kühlt sich das Granulat dann bereits wieder ab. Am Ende der Verweilzeit wird wenig Leistung pro Volumeneinheit aufgenommen, da nur noch wenig Wasser enthalten ist, das dadurch nur langsam verdunstet und nur wenig Verdunstungskälte zur Verfügung stellt.

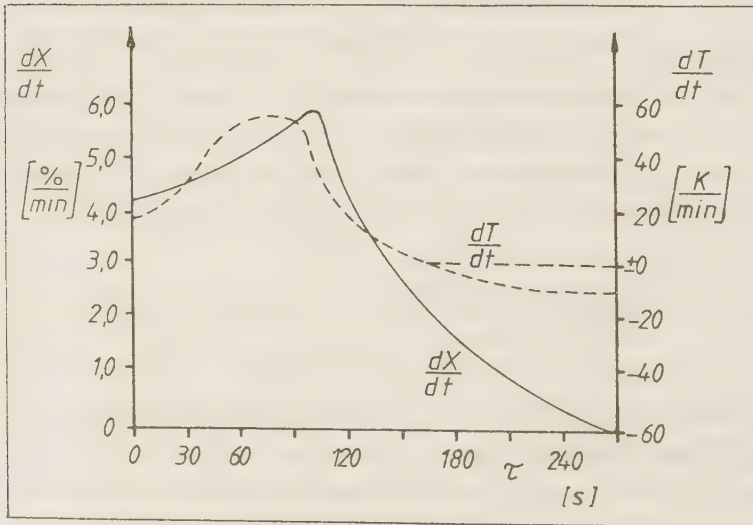


Abb. 17: Trocknungsgeschwindigkeit und Temperaturänderungsgeschwindigkeit von Granulat A

Der Temperaturanstieg ist bei Präparat A geringer als bei Präparat C,

da infolge der höheren Ausgangsfeuchte bei Granulat A die Verdunstungskälte einen Höheren Beitrag liefert,

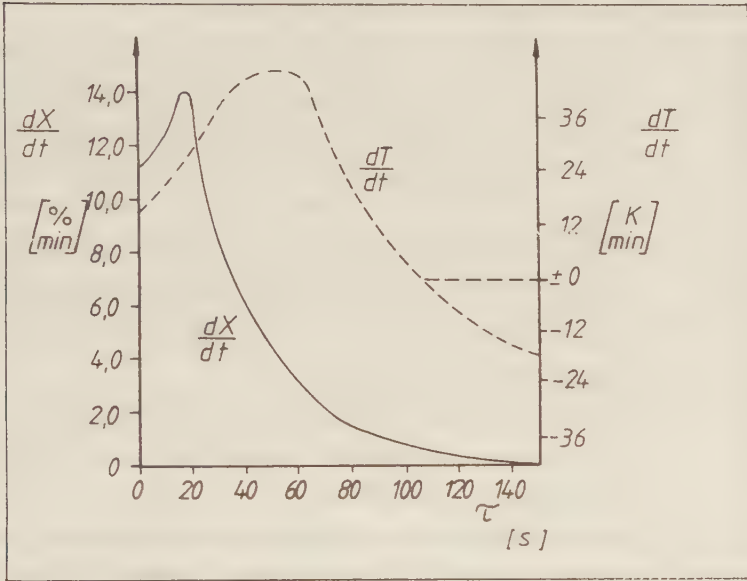


Abb. 18: Trocknungsgeschwindigkeit und Temperaturänderungsgeschwindigkeit von Granulat C

Bei der Trocknung von Granulat C eilt das Maximum der Trocknungsgeschwindigkeit dem der Temperaturänderung voraus. Infolge des geringen Wasseranteiles sind Agglomerate kleiner, sodaß die Verdunstung schneller verläuft. Dadurch wird das Gut langsamer erwärmt, die Verdunstungsrate sinkt sehr schnell, sodaß das restliche, im Granulat noch vorhandene Wasser elektrische Leistung aufnimmt und zu einer Erwärmung der Schüttung führt. In folgender Beziehung (35) sind die einzelnen Vorgänge bei der Trocknung zu einer Energiebilanz zusammengefaßt.

$$-m_{Gr} \Delta H_V \frac{dX}{dt} + X_o P_{HF} - m_{Gr} \frac{dX}{dt} c_{p_w} (T_{Gr} - T_L) - \quad (35)$$

$$-m_{Gr} c_{p_{Gr}} (T_{Gr} - T_L) = 0$$

Isoliert man die beiden ersten Terme aus dieser inhomogenen Differentialgleichung, so erkennt man, daß die Trocknung einen exponentiellen Verlauf nimmt.

Folgende Feststellungen können getroffen werden:

1. Je höher die Ausgangsfeuchte des Granulates ist, desto geringer ist die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs, da die Verdunstungskälte der Erwärmung der Granülen infolge der Leistungsaufnahme aus dem Hochfrequenzfeld entgegensteht.
2. Die Granulattemperatur sinkt wieder, wenn der Feuchtegehalt des Granulates und damit die Leistungsaufnahme so gering geworden ist, daß die Trocknungsluft und die Verdunstungskühlung das Granulat abkühlen.
3. Bei Granulaten mit hohem Feuchtegehalt fallen die Maxima Trocknungsgeschwindigkeit mit dem der Temperaturanstiegsgeschwindigkeit zusammen.
4. Bei Granulaten deren Anfangsfeuchtegehalt weniger als 10 % beträgt, ist die Erwärmungsgeschwindigkeit geringer, weil die Leistungsaufnahme kleiner ist. Da die im Granulat gespeicherte Wärme eine größere Leistungsaufnahme hat, tritt die größte Temperatur zu einem späteren Zeitpunkt als die größte Trocknungsgeschwindigkeit auf.

4.1.3 Interpretation der Trocknungsergebnisse

Vergleicht man die in Tabelle 2 angegebenen Werte für P_{HF} mit den Trocknungswerten aus Tabelle 4, so kann man feststellen, daß bei keiner der untersuchten Schichtdicken die vom Generator angebotene Leistung auch nur zu 50 % ausgenutzt wurde. Die Schichtdicke von 10 - 12 mm war bereits so groß, daß die Geschwindigkeit der Bründendiffusion geringer als die der Wasserverdampfung war. Dies kann daraus geschlossen werden, daß bei gleicher Verweilzeit mit steigender Schichtdicke die Granulattemperatur und die Restfeuchte X_E anstiegen. Die Zunahme

der Granulattemperatur ist auf die Leistungsaufnahme des Wassers im Granulat zurückzuführen. Bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur wurde auch der Wirkstoff geschädigt.

Auf der anderen Seite führten die das Gut verlassenden Brüden im Luftspalt zwischen Bettoberfläche und Elektrodenunterkante bereits bei einer Schichtdicke von 10 - 12 mm zu Nebelbildung und Kondensation an der Elektrode und die herabfallenden Wassertropfen erzeugten Überschläge zwischen den Feuchtenestern und der Elektrode. An einzelnen Stellen bildeten sich mehrere benachbarte Tropfen, die beim Herabfallen ins Gut Feuchtenester ergaben. Aus diesen Gründen wurde kein Versuch mit einer Schichtdicke von 18 - 30 mm gefahren, da ein stationärer Betrieb bei einer, zur Trocknung der erhöhten Schichtdicke d_2

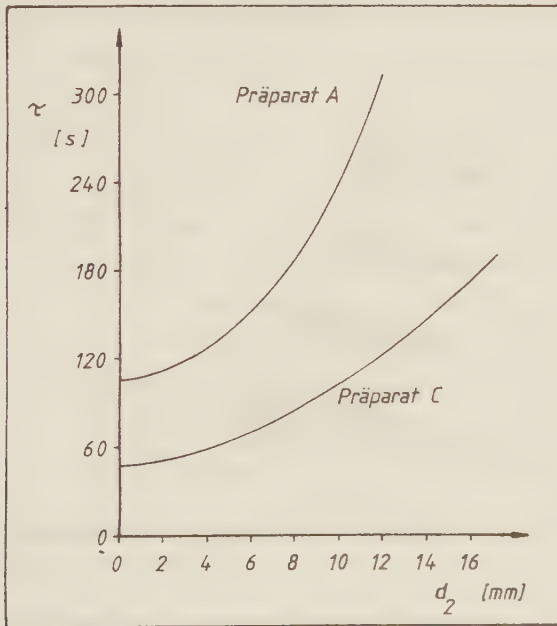


Abb. 19: Diagramm der Verweilzeit über der Schichtdicke für Granulate jeweils konstanter Zusammensetzung (zu erzielende Restfeuchte 1,5 Gew.-%)

notwendigerweise angehobenen Spannung nur sehr kurze Zeit oder gar nicht möglich gewesen wäre. In den Feuchtenestern wird der Wirkstoff infolge von Hydrolyse auf eine Konzentration von weniger als 18 % reduziert. Bei einer reduzierten Schichtdicke von weniger als 10 mm kann wie aus Tabelle 4 zu entnehmen ist, ein ausreichender Trocknungsgrad erzielt werden. Eine Verweilzeitänderung um einen Betrag von 10 % hat keinen merklichen Einfluß auf die Temperatur des Gutes und den Abbau des Wirkstoffes. Das kann dadurch erklärt werden, daß die pro Volumeneinheit Granulat aufgenommene Leistung mit abnehmender Feuchte, d.h. mit dem im Hochfrequenzfeld zurückgelegten Weg sinkt und damit das letzte Teilstück des Trocknungsweges keine wesentliche Änderung von Tem-

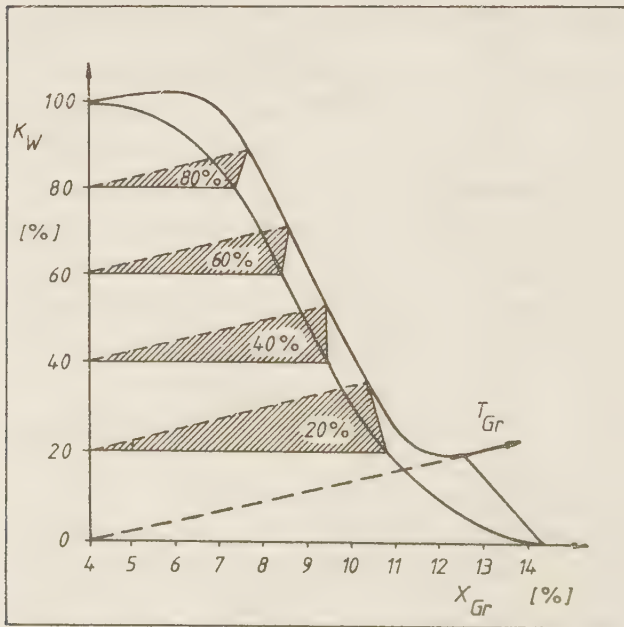


Abb. 20: Qualitatives Diagramm über den Zerfall eines hydrolyseempfindlichen Wirkstoffes für verschiedene Granulattemperaturen und Restfeuchten bei einer gegebenen Verweilzeit ($\tau = \text{const}$)

peratur und Feuchte mit sich bringt,

Oberhalb einer bestimmten Schichtdicke geht die Verweilzeit zur Erreichung einer Restfeuchte von 1,5 Gew.-% unendlich, d.h. die Verweilzeit verliert infolge von Diffusionswiderständen ihre Bedeutung.

1, Quasi-Festbett kann bei einer hohen Schichtdicke nur eine lange Verweilzeit im Hochfrequenzfeld die Restfeuchte des Granulates auf den geforderten Wert einstellen. Oberhalb eines Grenzbereiches, der durch große Schichtdicken vorgegeben ist, vermag die Verlängerung der Verweilzeit die Diffusionshemmung nicht mehr zu kompensieren. In diesem Zustand ist dann die Wirkstoffschädigung am größten.

Das Diagramm von Abbildung 20 macht in anschaulicher Weise deutlich, wie Temperatur und/oder Feuchte und in welcher Relation, d.h. ab welcher kritischen Ebene der Wirkstoff infolge chemischer Reaktion, bzw. physikalischer Effekte abgebaut wird.

Aus den Versuchsergebnissen können folgende Schlüsse gewonnen werden:

1. Die Leistungsaufnahme des im Gut enthaltenen Wassers im Hochfrequenzfeld ist so groß, daß ein Volumenelement innerhalb von 200s getrocknet werden kann.
2. Die Restfeuchte des Produktes kann durch die Verweilzeit im HF-Feld und durch die HF-Spannung auf das gewünschte Maß eingestellt werden.
3. Die Abführung der Brüden aus dem Gut war in der vorhandenen Anlage unzureichend. Es müssen daher Überlegungen angestellt werden, diesen Mangel zu beheben.

Bei einer Neukonstruktion muß folgenden Gesichtspunkten Rechnung getragen werden.

1. Gute Abführung der Brüden mit Hilfe eines Luftstromes, der das Granulat durchströmt.
2. Erwärmung der Luft zur Erhöhung der Aufnahmefähigkeit an Wasserdampf.

3. Anströmung der Elektrode mit Luft zur Vermeidung von Kondensation.

Die Forderung 1) kann am besten in einer Wirbelschicht erfüllt werden. Eine solche Wirbelschicht kann durch die richtige Geschwindigkeit der Luft oder auf mechanischem Weg durch Vibration erzeugt werden. Eine Koppelung beider Komponenten gewährleistet einen ausreichenden Abstand der Wirbelschicht zur Elektrode.

4.1.4 Folgerungen aus dem Betrieb von Versuchsanlage I

Ziel der Untersuchungen an Versuchsanlage I war es, festzustellen, ob erstens das Prinzip der Erwärmung und Trocknung von Feuchtgut durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung für pharmazeutische Granulate geeignet ist und ob zweitens der Bandtrockner als solcher die Funktion der Zu- und Abführung des Gutes sowie den Abzug der Brüden gewährleisten kann.

Wie weiter oben ausgeführt, ist die wichtigste Anforderung, die an eine neue HF-Trocknungsanlage gestellt werden muß, eine ausreichende Abführung der Brüden. Die Abtransportgeschwindigkeit der Brüden muß der gleichen Geschwindigkeit ihrer Entstehung bei einem ausreichend hohen Durchsatz entsprechen:

$$\dot{m}_{\text{ges}} = \dot{m}_{\text{TG}} + \dot{m}_{\text{W}} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{\text{W, D}} \stackrel{!}{=} \dot{m}_{\text{W}} - \dot{m}_{\text{RF}} \quad (37)$$

$$\dot{m}_{\text{RF}} = \dot{m}_{\text{TG}} \cdot X_{\text{RF}} \quad (38)$$

Die durch die HF ins Gut eingebrachte Energie, (ohne Berücksichtigung der Verlustleistung durch dielektrische Verluste) kann eine qualitativ gute Trocknung ohne Wirkstoffverlust infolge einer kurzen feucht-warmen Phase ermöglichen, wenn durch eine erzwungene konvektive Luft-

strömung die erzeugten Brüden abgeführt werden wie sie entstehen. Nach Müller und Morgenstern /31/ gibt es zwei Alternativen, welche die Dampfentwicklung aus dem zu trocknenden Gut ermöglichen, ohne daß es durch den Dampfdruck in den Porenkanälen zu einer Zerstörung der Granülen oder zu einer thermischen Schädigung des Wirkstoffs kommt:

- a) Abführung des Dampfes aus dem Wirbelbett durch einen Luftstrom
- b) impulsartige Einwirkung des Hochfrequenzfeldes, wobei in den Pausen zwischen 2 Impulsen der Dampf in einem, über das Gut streichenden Luftstrom entweichen kann

Zur Trocknung von Granulaten stellt Variante a erhöhte Anforderungen an die Technik des Trocknens, während Variante b zu Lasten des Durchsatzes geht.

Huang und Yates schlagen vor, zur Trocknung von Mykroprotein ein kombiniertes Verfahren von Hochfrequenz- und Heißluftendtrocknung anzuwenden, wobei nacheinander gestaffelt zuerst die Hochfrequenz den größten Anteil der Feuchte in den gasförmigen Aggregatzustand überführt. Anschließend übernimmt die Heißluft die Endtrocknung in einem Bereich in dem das Dielektrikum des bereits weitgehend getrockneten Produktes eine wirtschaftliche Anwendung der Hochfrequenztechnik unmöglich macht.

Alt /33/ beschreibt bei der Trocknung temperaturempfindlicher Güter auf einem Hochfrequenzbandtrockner ähnliche Phänomene, wie sie auch in dieser Arbeit gefunden wurden. Wenn mehr Energie dem zu trocknenden Gut zugeführt wird als Feuchtigkeit verdampft, können sich örtliche Dampfblasen ausbilden, deren steigender Druck eine reine Dampfströmung bewirkt. In Schüttgütern sind die Widerstandsbeiwerte gering und daher ohne nachteiligen Einfluß auf die Kornstruktur der Granülen, nur thermo- und/oder psychrolabile Materialien erfahren eine Schädigung. Daher

müssen die Brüden im letzten Fall in der Geschwindigkeit ihrer Entstehung abgezogen werden.

Ein Fließbettrockner auf Mikrowellenbasis wird von McCornich /34/ im Lebensmittel- und pharmazeutischen Bereich vorgeschlagen, wobei angemerkt wird, daß die in das Gut eingetragene Leistung mit sinkender Frequenz steigt. Besonders eignen sich für das Verfahren viele Feststoffe, die nach dem Verdampfen des Wassers sehr niedrige elektrische Verluste aufweisen.

Sobiech /25/ schlägt eine Mikrowellen-Vakuum-Trocknung vor, die bei der Pflanzentrocknung für Nahrungsmittelzwecke den Geschmack der zu trocknenden Wurzeln am wenigsten schädigen würde. Ungünstig wirkt sich die reine Lufttrocknung im Wirbelbett auf die Qualität des Gutes aus. Holme und Metaxe /36/ ordnen bei der kontinuierlichen Trocknung von bahnförmigen Textilien nacheinander die Trocknung mit Heißluft und Mikrowellen an. Sie begründen diese Konstruktion damit, daß die Wirtschaftlichkeit einer herkömmlichen Heißlufttrocknung nur in Bereichen hoher Produktfeuchte gegeben sei, während die Mikrowelle gezielt selektiv auf die geringe Restfeuchtigkeit am Ende der Konvektionsstrecke einwirke. Sie löse eine intensive Diffusion des im Inneren enthaltenen Wassers an die Oberfläche sowie die daran anschließende Verdampfung aus. Lefeuve et al. /37/ berichten von Versuchsergebnissen an Granülen, die - basierend auf dem Wirkungsgradvergleich - den Einsatz von elektromagnetischen Wellen am Anfang der Trocknungsstrecke empfehlen, um die Diffusion vom Kern des Materials an die Oberfläche durch Erzeugung einer entsprechenden Druck- und Temperaturdifferenz, absteigend von innen nach außen, zu beschleunigen. Die gesamte Flüssigkeit befinde sich dann an der Außenhaut der Granüle, von wo sie nach den Gesetzen der Trocknung als adhäsiv gebundene Flüssigkeit mit Heißluft abgetrocknet werden kann.

Shalatov et al. /38/ berichten von Versuchen mit Hochfrequenz mit einem Trocknungsapparat, der das auf dem Band durch das HF-Feld geführte Schüttgut im Bereich unter der Elektrode einer Vibrofluidisation unterzieht. Dabei werden das Band und das darauf mittels Vibration auf-

gelockerte Produkt von Luft durchströmt, was zur Folge hat, daß die Brüden sehr rasch abgezogen und über den Kopfteil des Trockners vor Eintreten einer Rekondensation entfernt werden können.

In diesem Zusammenhang wird vorgeschlagen /52, 53, 54, 55/, an Stelle einer Plattenelektrode Stabelektroden zu verwenden, die einen besseren Abzug der Luft und der Brüden gewährleistet.

In verschiedenen Veröffentlichungen und Vorträgen /39, 40, 41, 42/ werden die Vorteile eines vibrofluidisierten Bettes bei der Trocknung von Schüttgütern herausgestellt. Im folgenden sind die wichtigsten zusammengefaßt:

- enges Verweilzeit - Spektrum
- gute Verweilzeit - Kontrolle
- gute Homogenität der Wirbelschicht (geringe Neigung zur Blasenbildung)
- schonender Prozeß
- geringe Gasgeschwindigkeit bei sicherer Fluidisierung
- intensiver Wärme- und Stoffaustausch
- spezifisch geringer Energieverbrauch

Die Vibrofluidisation wurde dabei den Systemen Festbett, bzw. pneumatische Fluidisation gegenübergestellt.

In allen, oben zitierten Verfahrensbeschreibungen wird der Einsatz der kontinuierlichen Wirbelschichttechnologie vorgeschlagen. Dabei wird deutlich, daß eine weitere wesentliche Optimierung dieses Verfahrensprinzips dann erreicht wird, wenn ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld mit einem Vibrationsfließbett zu einer sinnvollen Funktionseinheit gekoppelt wird. In dieser Variante gewährleistet die Vibrationswirbelschicht den sauberen Transport der Granulate durch den Apparat und die Erzeugung einer gut durchströmten Wirbelschicht, aus der die Brüden bei geringem Luftdurchsatz abgezogen werden können.

Aus der Literatur und in Anbetracht der Ergebnisse aus Versuchsanlage I können folgende Anforderungen für einen leistungsfähigen Hochfrequenz-Trockner formuliert werden:

- 1) Die kontinuierlich zu trocknende Granulatschüttung darf nur mit Edelstahlflächen in Berührung kommen.
- 2) Die Schüttung, d.h. das Fließbett muß fluidisiert werden, um die Brüden abführen und die Guttemperatur niedrig halten zu können.
- 3) Der das fluidisierte Bett durchströmende Luftstrom muß auf eine niedrige Rate begrenzt werden, um eine starke Aufwirbelung und Austragung des Feinanteiles zu vermeiden.
- 4) Der Luftstrom sollte - insbesondere bei sehr feuchten Granulaten - beheizt werden können, um das Aufnahmepotential der Luft für Wasserdampf so groß als möglich zu machen, ohne jedoch dadurch das Granulat aufzuheizen, bzw. den Kühlungseffekt der Luft durch Abzug der Verdampfungsenthalpie zu eliminieren.
- 5) Die Fluidisierung des Bettes muß durch Vibration des durchströmten Bodens erfolgen, da dies den geringsten Luftdurchsatz erfordert.
- 6) Aus elektrotechnischen Gründen muß die Elektrode mit gleicher Vibrationsfrequenz und -amplitude schwingen wie der Boden.
- 7) Der Elektrodenabstand muß variiert werden können, um den Arbeitsschwingkreis - dessen wesentlicher Bestandteil das Trocknungsgut ist - optimal auf die Resonanzfrequenz abstimmen zu können.
- 8) Die Zu- und Abluftströme sind so einzustellen, daß der Differenzdruck p der Luft unmittelbar über der Wirbelschicht gegenüber dem äußeren Luftdruck p_{Atm} gegen 0 geht.
- 9) Alle auf die Trocknung einwirkenden Parameter müssen in weiten Bereichen variabel sein, um die optimale Einstellung herausfinden zu können.

- 10) Der zu bauende Trockner ist als Technikumsgerät unter Minimierung der Herstellkosten auszulegen.

Aufgrund dieser Anforderungen war eine Pilotanlage zu konstruieren, die in der Lage ist, Granulat mit einem so großen Durchsatz zu trocknen, daß ein späterer Up-scaling zu einer Produktionseinheit möglich ist.

4.1.5 Trocknung in der Wirbelschicht

Für die Ermittlung des Wärme- und Stoffaustausches in der Wirbelschicht wurden mehrere Modelle vorgeschlagen, die im folgenden aufgezählt und kurz beschrieben werden.

W. Fritz /48/ geht von identischen Beziehungen für Wärme- und Stofftransport für das Festbett und die Wirbelschicht unter folgenden Bedingungen aus:

- bei der Berechnung wird stets der jeweiligen Gasgeschwindigkeit zugeordnete Hohlraumanteil - dem Auflockerungsgrad der Schüttung entsprechend - eingesetzt
- nahezu der gesamte Druckabfall erfolgt in der Schüttung selbst. Bei kleinen Reynoldszahlen in der Wirbelschicht fällt der Wärme- und Stoffaustauschkoeffizient infolge von Strahlen- und Blasenbildung stark ab.

Krischer /25/ ermittelt den Massenstrom des Wasserdampfes $\dot{m}_D$ für über- und durchströmte Güter bei konvektiver Trocknung nach folgender Gleichung:

$$\dot{m}_D dS = dS \frac{\alpha'}{R T_L} (P_{D_0} - P_{D_L}) \quad (39)$$

α' ist dabei der Stoffübergangskoeffizient des Wassers, dS ein Flächenelement der Schüttung (freier Querschnitt), T_L die Temperatur der Luft, R die universelle Gaskonstante, $P_{D_0} - P_{D_L}$ die Dampfdruck-

differentz des Wasserdampfes zwischen dem Dampfdruck der Abluft und dem der Zuluft. Die aus Gut durch Konvektion übertragene Wärmemenge ergibt sich zu

$$\dot{q} dS = - \dot{m}_L C_{P_L} (T_{Lo} - T_L) \quad (40)$$

O. Molerus /20/ gibt Beziehungen für die laminare und turbulente Durchströmung von Schüttungen gröberer Partikel an. Danach kann die für die Erreichung des Lockerungspunktes notwendige Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Dichte des Gutes, der mittleren Partikelgröße sowie der Porosität der Schüttung ermittelt werden. Diese Beziehungen besitzen jedoch nur dann Gültigkeit, wenn die Wirbelschicht ausschließlich durch einen Luftstrom erzeugt wird. Wenn die Vibration zur Lockerung einer Schüttung eingesetzt wird, kann die Geschwindigkeit der Luft wesentlich verringert werden, da die Luft nur noch zur Aufnahme der Brüden benötigt wird.

Palancz /21/ wie auch Reh /22, 60/, Werther /23/ sowie Molerus /59, 61/ beschreiben ein dreiphasiges Wirbelschichtmodell, das aus einer Blasenphase, einer umgebenden Gasphase und einer Feststoffphase besteht. Stellvertretend für die Klasse der Blasenmodelle wird in Abb. 21 das Modell von Kunii und Levenspiel /24/ vorgestellt.

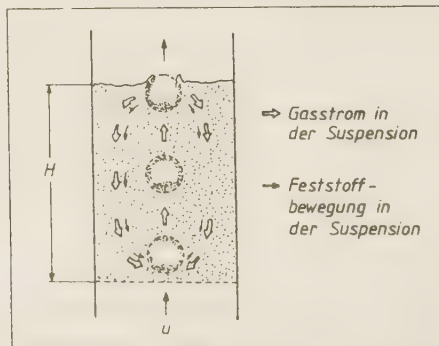


Abb. 21: Wirbelschichtmodell von Kunii und Levenspiel

Bauer /64/ beschreibt das Zweiphasenmodell von May, dessen Randbedingungen eine Anwendung des Modells auf den Hochfrequenz-Vibrations-wirbelschichttrockner ermöglichen:

1. Alles Gas, was über die Minimalfluidisation erforderliche Menge hinausgeht, durchströmt das Bett in der Blasenphase.
2. Zwischen Blasen- und Suspensionsphase findet ein Stoffaustausch statt, der mit dem über der Höhe der Wirbelschicht gemittelten und auf das Wirbelschichtvolumen bezogenen Stoffaustauschkoeffizienten α beschrieben wird.
3. Die Blasenphase ist feststofffrei angenommen. Das Gas durchströmt die Blasenphase in Kolbenströmung.
4. Bei der Strömung des Suspensionsphasengases wird eine Axialdispersion gekennzeichnet durch den Dispersionskoeffizienten D_{ax} zugelassen.
5. Die Reaktion findet nur in der Suspensionsphase statt, da die Blasenphase feststofffrei angenommen ist. Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k der heterogen katalytischen Reaktion erster Ordnung ist auf das Volumen der Suspensionsphase bezogen.

Die Reaktion die bei der Trocknung durchgeführt wird, ist die Verdampfung des Wassers an der Oberfläche des Gutes. Bei dem Modell werden aus einer kubischen Gleichung dimensionslose Größen gebildet, die nach Stoffaustauscheinheiten und Reaktionseinheiten unterschieden werden:

$$N_{\alpha} = \frac{\alpha^1 d_2}{u - u_{mf}} \quad \text{Anzahl Stoffaustauscheinheiten} \quad (41)$$

$$N_r = \frac{K (1 - \epsilon_b) d_2}{u - u_{mf}} \quad \text{Anzahl Reaktionseinheiten} \quad (42)$$

ϵ_b ist dabei der Volumenanteil des Blasengases in der Wirbelschicht, α^1 der auf das Wirbelschichtvolumen bezogene Stoffaustauschkoeffizient. Da die Vibration am Hochfrequenz-trockner die Minimalfluidisation erzeugt,

kann der Volumenanteil des Blasengases vernachlässigt werden ($\epsilon_b \rightarrow 0$), gleichzeitig wird $u_{mf} = 0$.

Die Reaktion, die während der Trocknung in der Wirbelschicht vor sich geht, kann beschrieben werden:

$$\frac{dX}{dt} = k_v X_o \quad (43)$$

mit einer Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten.

Den Stoffaustauschkoeffizient gibt Werther /65, 66/ mit folgender Beziehung an:

$$\alpha' = 3,44 \cdot 10^{-4} \frac{1}{0,1} \sqrt{1 + 27 (u - u_{mf})} \quad (44)$$

Wie aus Abb.22 zu erkennen ist, wird die Höhe der Wirbelschicht in verschiedene Zonen unterteilt. Für geringe Schichtdicken im mm-Bereich kann in der Bodenzone bei Verwendung eines Siebbodens mit einem großen Freiflächenanteil bei enger Teilung eine intensiv vermischte Gas-Feststoffphase erzeugt werden.

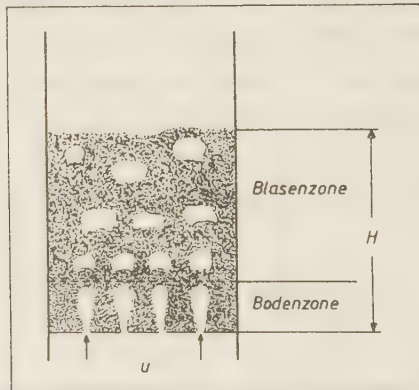


Abb.22: Berücksichtigung der Gasverteilung im erweiterten Zweiphasenmodell /64/

Für durchströmte Schüttungen wird der Massenstrom des Wasserdampfes nach Krischer /25/ zu

$$\frac{\dot{m}_{D,1}}{\dot{m}_{D,10}} = \exp(-1) \left(\frac{\alpha' g_L s}{\dot{m}_L} \right) \quad (45)$$

ermittelt.

Bei Einsatz von Versuchsanlage II konnten diese Betrachtungen nicht angewandt werden. Für sie kommen Gesetzmäßigkeiten nach dem Prinzip "durchströmte ruhende Güter" in Frage, da jede Volumeneinheit des Gutes zu gleicher Zeit von Luft gleichen Zustandes durchströmt wird. Daher bleibt die kontinuierliche Förderung des Granulates durch den Apparat ohne Einfluß auf das Wärme- und Stofftransportmodell. Zur Betrachtung des Stoffaustausches schlägt Kneule /12/ vor, die fluidisierte oder gasdurchströmte Schüttung als quasi homogenes Fluid anzunehmen.

4.1.6 Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des die Vibrationswirbelschicht erzeugenden Schwingförderer

Die Gutbewegung auf dem Förderorgan kann nach Thelen /26/ durch folgende Modellvorstellung beschrieben werden:

Die harmonische Erregung verschiebt das Förderorgan parallel zu sich selbst unter dem Wurf- oder Schwingungswinkel.

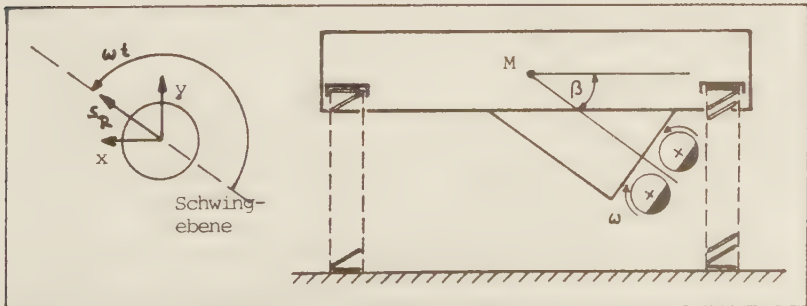


Abb. 23: Darstellung des Schwingungsweges als Projektion des umlaufenden Vektors s_R auf die Schwingungsebene

Zur Ermittlung des optimalen Wurfwinkels und der Amplitude G wird eine Maschinenkennziffer K eingeführt, die als das Verhältnis der maximalen Beschleunigung in Schwingrichtung zur Erdbeschleunigung definiert wird:

$$K = \frac{\omega^2 G}{g} \quad (46)$$

In der Praxis wird zur Beherrschung der auftretenden Massenkräfte K so gewählt, daß die Werte 6 - 7 betragen. Mit steigender Maschinenkennziffer K wird der Wurfwinkel β kleiner. Anders jedoch als bei reinen Schwingförderern, deren Aufgabe ausschließlich der Transport des Gutes ist, kommt es beim Vibrationsfließbettrockner auf eine maximale Fluidisierung an, d.h. der Wurfwinkel wird so eingestellt, daß sich die richtige Verweilzeit ergibt. Je größer der Winkel ist, desto größer wird die Amplitude. Mit steigender Erregerfrequenz sinkt die Amplitude gemäß der Beziehung

$$f_{\text{Err}} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{Kg/G} \quad (47)$$

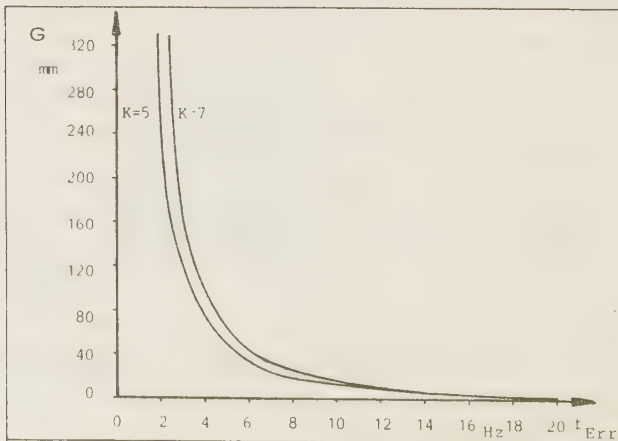


Abb. 24: Amplitudenhöhenverteilung über der Erregerfrequenz bei Variation der Maschinenkonstanten K

Es wurde eine Wurfkennziffer Γ eingeführt, deren Wert entscheidet, ob Wurf- oder Gleitförderung vorliegt:

$$\Gamma = \frac{\omega^2 G \sin \beta}{g} \quad (48)$$

Nach der Beziehung $K = \frac{\Gamma}{\sin \beta}$ ist in Abbildung 24 der Zusammenhang zwischen der Amplitude G und dem Wurfwinkel β bei verschiedenen Maschinenkonstanten dargestellt. Die Wurfbewegung ist für $\Gamma \gg 1,0$ gewährleistet, bei kleineren Werten für Γ liegt Gleitförderung vor. Qualitativ können aus den Abbildungen 24 und 25 folgende Schlüsse gezogen werden:

- mit steigender Maschinenkennziffer nimmt die Wurfkennziffer bei konstantem Wurfwinkel zu
- mit größer werdendem Wurfwinkel wächst die Wurfkennziffer bei konstanter Maschinenkennziffer
- mit steigender Amplitude wächst der Fluidisierungsgrad, während die Transportgeschwindigkeit sinkt

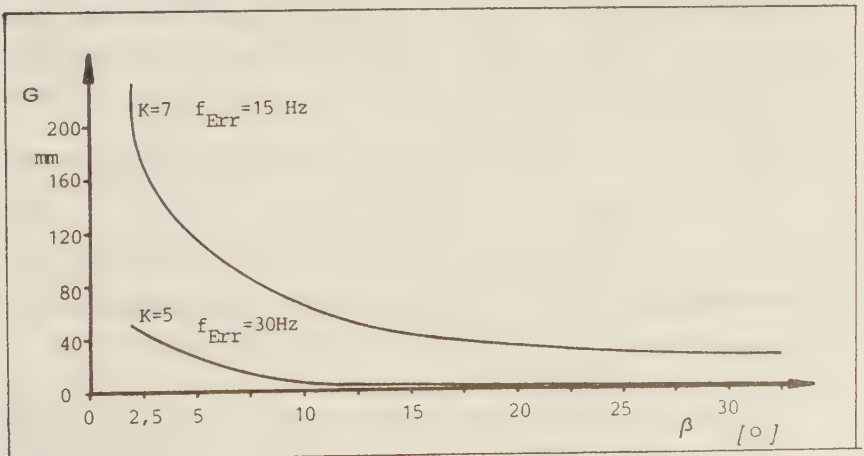


Abb. 25: Amplitudenhöhenverteilung über dem Wurfwinkel

Die Bewegungsgleichungen erlauben eine Abschätzung, bei welchem Wurfwinkel der Schwingförderer das Gut fluidisiert oder transportiert, d.h. wenn die horizontale oder vertikale Komponente überwiegt:

$$s_R(t) = G (1 - \cos 2 f_{Err} \pi t) \quad (49)$$

s_R ist dabei die Länge des Transportvektors.

Die Zerlegung /26, 27/ in Horizontal- und Vertikalkomponente ergibt:

$$x_R(t) = s_R(t) \sin \beta = G (1 - \cos 2 f_{Err} \pi t) \sin \beta \quad (50)$$

(horizontal)

$$y_R(t) = s_R(t) \cos \beta = G (1 - \cos 2 f_{Err} \pi t) \cos \beta \quad (51)$$

(vertikal)

Im Sinne eines effektiven Trocknungsprozesses ist es notwendig, daß die vertikale y - Komponente der Vibration gegenüber der x - Komponente überwiegt. Das Verhältnis aus beiden ist ein direktes Maß für die Transportgeschwindigkeit des jeweiligen Feuchtgutes, die an der Trocknungsgeschwindigkeit ausgerichtet wird. Die dynamische Erregerkraft ergibt sich aus der schwingenden Masse, der Federzahl und der Erregerfrequenz:

$$m \ddot{s}_R + \mathcal{G}_D \dot{s}_R + c s_R = F_o \cos \omega t \quad (52)$$

In der folgenden Beziehung wird der Einfluß der Erregermasse auf die Amplitude deutlich:

$$G = \frac{m_o r_o}{m} \gamma_A^2 R_r \quad (53)$$

γ_A als das Abstimmungsverhältnis und D als eine Dämpfungskonstante

sind konstruktiv bedingte Größen.

Ausführlich lautet diese Gleichung folgendermaßen:

$$G = \frac{m_o r_o}{m} \frac{\sqrt{A}}{(1 - \frac{2}{A})^2 + 4D^2 \frac{1}{A}} \quad (54)$$

Die Dämpfung D wird für verschiedene Werte im Bereich von 0,01 bis 0,02 direkt in Gleichung (54) eingesetzt.

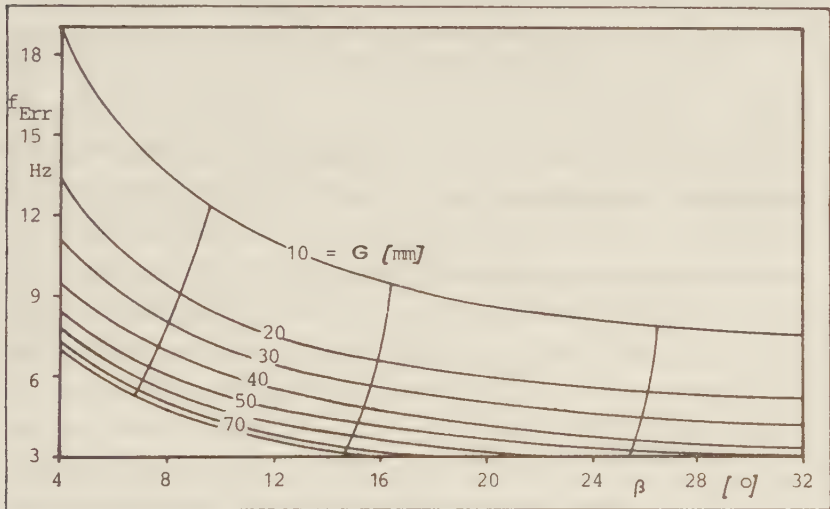


Abb. 26: Einfluß von Erregerfrequenz und Wurfwinkel auf die Amplitudenhöhe

Die Veränderung der Dämpfung hat zur Folge, daß sich das gesamte Niveau der Amplitudenhöhe verschiebt. Die Verschiebung ist infolge des sich mit der Erregerfrequenz verändernden Abstimmungsverhältnisses f_A nicht linear.

Die Erregerkraft kann aus der Beziehung

$$F_o = \omega^2 m_o r_o \quad (55)$$

erhalten werden. Die Erregerkraft wächst mit dem Quadrat der Kreisfrequenz des Erregers.

Die maximale horizontale Rinnengeschwindigkeit wird nach /28/

$$v_{h, \max} = \sqrt{g} \sqrt{KG} \cos \beta \quad (56)$$

ermittelt. Unter Berücksichtigung von Gleichung (50), bzw. (51) kann daraus die minimale horizontale Fördergeschwindigkeit abgeleitet werden:

$$v_{h, \min} = \sqrt{g} \sqrt{GK} \sin \beta \quad (57)$$

In beide Formeln gehen bei der Betrachtung der tatsächlichen Geschwindigkeit sehr stark stoffspezifische Korrekturfakten ein. Diese werden aus dem Quotienten der experimentell ermittelten realen Fördergeschwindigkeit und dem theoretischen Wert gebildet:

$$v_h = t_K \cdot v_{h, \min (\max)} \quad (58)$$

4.2 Versuchsanlage II

4.2.1 Beschreibung der Anlage

Der entwickelte Trockner besteht aus einer Reihe von Einzelkomponenten, die im folgenden beschrieben werden.

Der Trocknungsapparat ist ein modifizierter Schwingförderer. Im Schwingkörper sind der Materialein- und auslauf, die Luftzuführung und -verteilung, der das Produkt aufnehmende Siebboden, die Elektrode mit Einspeisung und die Ablufthaube integriert. Daneben ist der Hochfrequenzgenerator angeordnet, der über ein, die mechanischen Schwingungen ausgleichendes Element die Elektrode speist. In den Trockner tritt von unten ein beheizbarer Zuluftstrom ein, der die Aufgabe hat, die Brüden aus der Wirbelschicht abzuführen. Die Elektrode ist über 3 Polyäthylenblöcke

als Isolatoren an 4 Drehspindeln an der Haube des Apparates aufgehängt. Durch Drehen der Spindeln kann der Abstand zwischen der Elektrode und dem darunter befindlichen Siebboden in Halbmillimeterschritten verstellt werden, sodaß eine feine Abstimmung des Arbeitsschwingkreises möglich ist. Zu- und Abluftströme sowie die Zulufttemperatur können stufenlos verstellt werden. Die Hochfrequenz-Spannung muß zur Erreichung der Trocknungseffektivität möglichst nahe an der Grenzspannung von 2000 V/cm Elektrodenabstand gefahren werden. Der Elektrodenabstand hat dann sein Optimum, wenn bereits bei niedriger Elektrodenspannung die Leistungsabgabe der Hochfrequenz ins Gut groß ist.

Über der Granulat-Eintragsöffnung ist der Granulator angebracht, der aus einem Dosiergerät versorgt wird. Dosiergerät wie der (nachdosierende) Granulator, haben die Aufgabe, das zu trocknende Granulat gleichmäßig kontinuierlich unter Erzeugung mechanisch fester Granülen dem Trockner zuzuführen. Diese Dosierung ist zur Messung stabiler Betriebszustände notwendig, sie kann jedoch auch schaufel- oder schubweise, beispielsweise aus einem Mischer, ohne Beeinträchtigung des Trocknungseffektes bis herab zur gewünschten Restfeuchte erfolgen. Die Vibration wird durch 2 zwangssynchronisierte gegenläufige Wellen erzeugt, auf denen Masseteilscheiben so angeordnet sind, daß sich die bei der Rotation auftretenden Kräfte in einer bestimmten Position zueinander eliminieren, in der dazu um 90° gedrehten Position aber addieren. Wellen und Motor sind zu einer Einheit zusammengefaßt, die unter dem Trocknergehäuse angebracht ist. Die von dem Vibrationserreger erzeugte resultierende Kraft muß durch den Schwerpunkt des Trockners gehen, wenn die Amplitude des schwingenden, auf Schraubenfedern gegenüber dem Untergestell gelagerten Trockners an allen Orten im Gerät gleich sein soll. Die Orientierung des durch den Schwerpunkt gehenden Vektors bestimmt die Form der Wurfamplitude. Der Wurfwinkel der Granülen gegenüber der Horizontalen ist identisch mit dem Winkel, der vom Unwucht-, d.h. Vibrationsantriebsvektor mit der Horizontalen gebildet wird. Je größer dieser Winkel ist, desto länger wird die Verweilzeit der einzelnen Granülen.

In Abbildung 27 und 28 ist der Versuchstrockner II in Front- und Seitenansicht dargestellt. Die Länge des Trockners beträgt 1500 mm, die Breite des Siebbodens 320 mm. In Abbildung 29 beschreibt eine Schemazeichnung die Konstruktion des Vibrationsantriebes, die Abbildung 30 a und 30b stellen seine Funktionsweise dar.

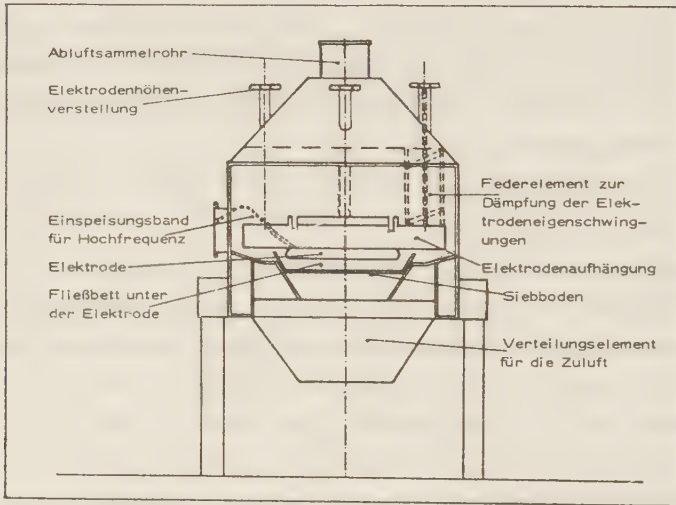


Abb.27: Seitenansicht Versuchstrockner II

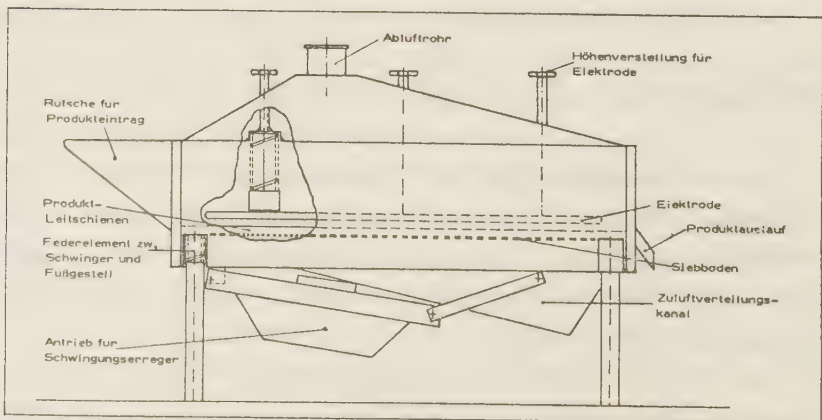


Abb.28: Frontansicht Versuchstrockner II

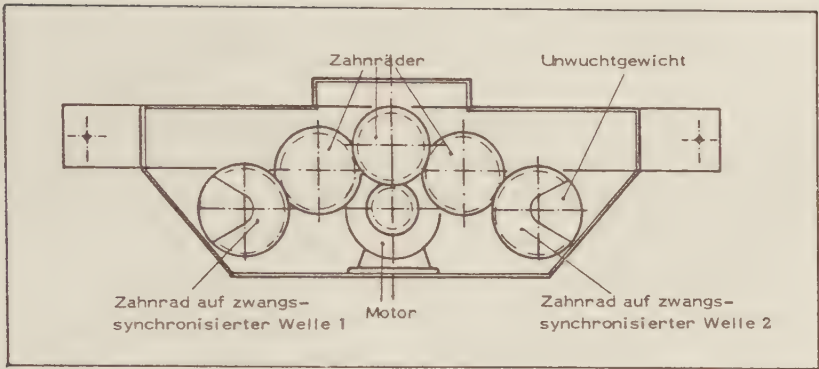


Abb. 29: Funktionsschema des Vibrationsantriebes

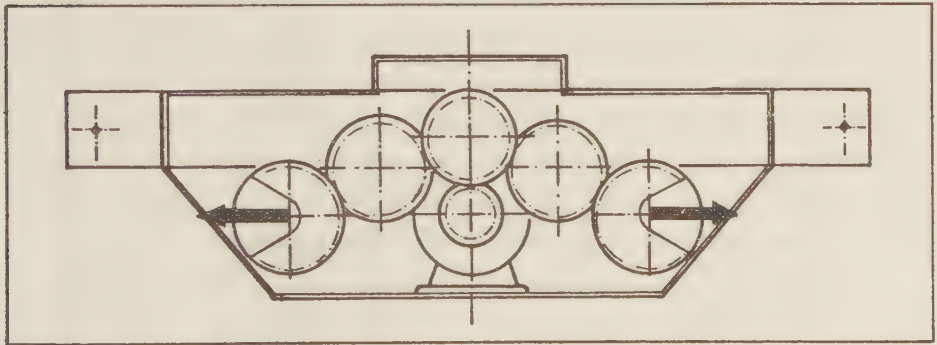


Abb. 30a: Darstellung der am Vibrationsantrieb wirkenden Kräfte (Elimination)

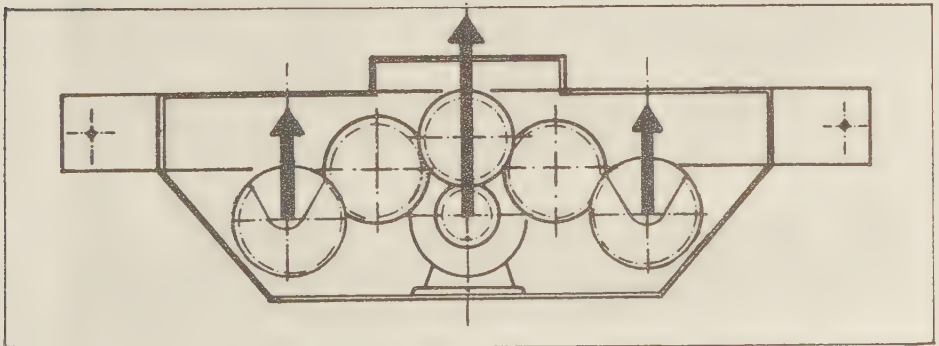


Abb. 30b: Darstellung der am Vibrationsantrieb wirkenden Kräfte (Superposition)

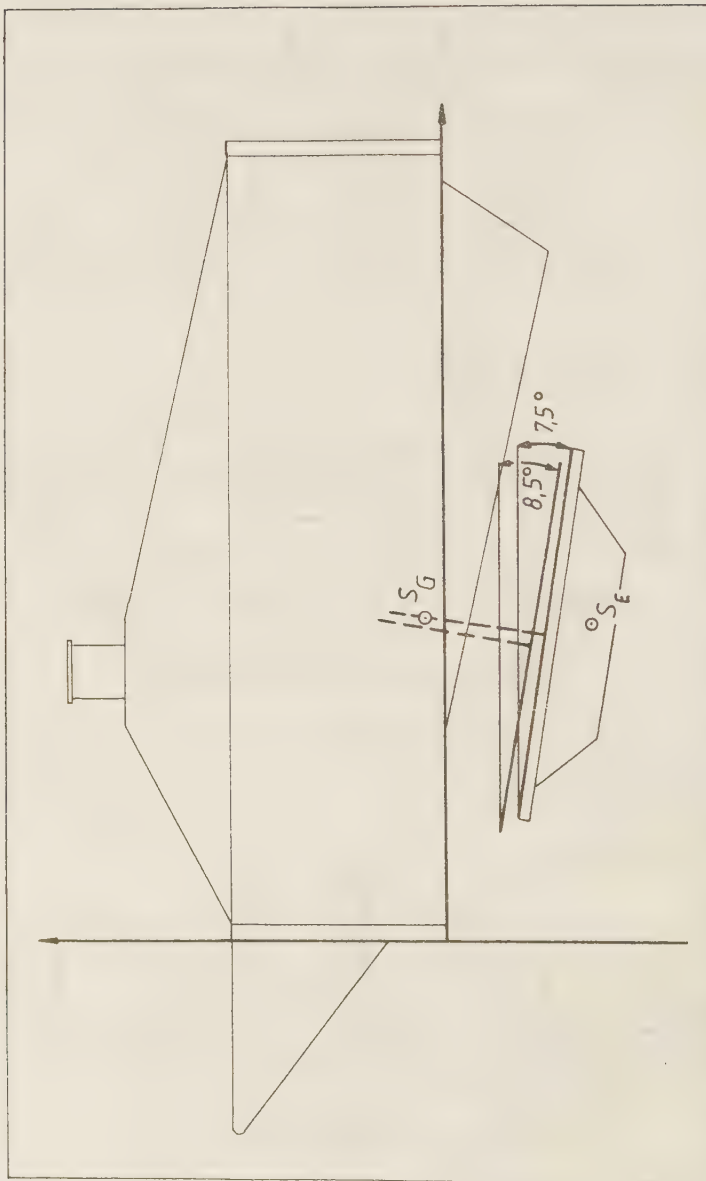


Abb. 31: Darstellung des Erregerschwerpunktes (S_E), des Gesamtschwerpunktes (S_G) und des Vibrationswinkels

Seine Wirkung auf den Trockner wird in Abb. 31 für verschiedene Anstellwinkel gezeigt.

Entscheidende Bedeutung kommt dem Siebboden zu. Seine Form sowie seine Steifigkeit gegenüber der Vibration haben eine direkte Auswirkung auf die Ausbildung der Wirbelschicht. Die Löcher des Siebbodens, für den eine feste freie Fläche und eine bestimmte Locheinteilung vorgegeben ist, sind auf eine Weise aus dem Blech gestanzt, sodaß die Luft beim Durchtritt durch die Löcher gerichtet wird (Markenzeichen: Conidur-Boden). Die Strömungsrichtung der Zuluft oberhalb des leeren Bodens kann als nahezu parallel bezeichnet werden, d.h. die Luft wird an der Oberkante des Bleches von der vertikalen in eine horizontale Richtung umgelenkt. Dadurch werden infolge des sich der Luft bietenden Widerstandes Kräfte auf die Granülen ausgeübt, welche die Transportgeschwindigkeit infolge der Vibration je nach Orientierung des Bodens und der Löcher beschleunigen oder verlangsamen. Die Fluidisierung des Granulates erfolgt durch die Vibration und durch den Luftstrom. Mittels Vibration wird größtenteils die zur Auflockerung des Gutes notwendige Leistung in das Bett eingebracht. Dies erfordert einen, im Vergleich zur ausschließlichen Luftfluidisierung geringeren Energieaufwand.



Abb. 32: Stark vergrößerte Aufnahme eines Conidurbodens /43/

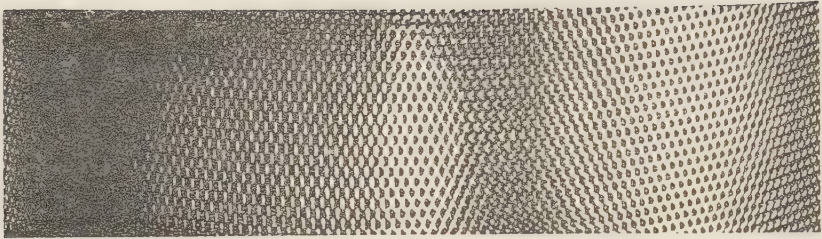


Abb.33: Vergrößerte Darstellung eines Conidurbodens

Dadurch kann der Zuluftstrom ausschließlich der Trocknung angepaßt werden, was sich weiterhin positiv auf die Energiebilanz des HF-Trockners auswirkt. Die Luft hat nach Durchtritt durch den Siebboden entweder dieselbe oder die entgegengesetzte Wirkungsrichtung wie die Vibration. So kann die Schüttdichte des im HF-Feld befindlichen Materials entweder durch Veränderung der Motorposition des Vibrationsantriebes oder durch Variation des Zuluftstromes geändert werden. Für die Kombination der Luftströmungsrichtung über dem Siebboden und der Wirkungsrichtung der Vibrationskraft bestehen 3 Möglichkeiten:

1. die Strömungsrichtung der Luft entspricht der gewünschten Transportrichtung des Granulates und steht der Vibration entgegen, die gegen den Einlaufpunkt des Granulates gerichtet ist. Dabei werden die schweren feuchten Granülen im Trockner zurückgehalten, während die trockenen leichter ausgetragen werden.
2. die Luftströmung wirkt entgegen der Transportrichtung, während die Vibration die Transportbewegung in Richtung auf den Auslauf der Granülen unterhält. Daher werden die feuchten Granülen mittels Vibration rasch durch den Apparat gefördert, während die leichten durch die Luftströmung am Weitertrans-

port gehindert werden.

3. Luftströmung und Vibration stimmen in ihrer Wirkung mit der Transportrichtung überein. Die schwereren Partikel haben eine etwas längere Verweilzeit als die leichteren, die mittlere Verweilzeit liegt jedoch unterhalb der aus beiden anderen Modellen.

4.2.2 Veränderbare Parameter und ihre Wechselwirkungen

Folgende Parameter an Versuchsanlage II unterscheiden sich von denen, die bei Versuchsanlage I beschrieben wurden:

Verweilzeit

Schichtdicke/Wirbelschicht-Charakteristik

Luftdurchsatz pro Masseinheit Granulat

Temperatur und Feuchte der Zuluft

Elektrodenabstand



Abb. 34: Wechselwirkungen der Parameter an Versuchsanlage II

Abbildung 34 zeigt im Vergleich zu Abbildung 1 die wichtigsten Parameter, die bei Veränderung einer Variablen simultan beeinflusst werden. Je-

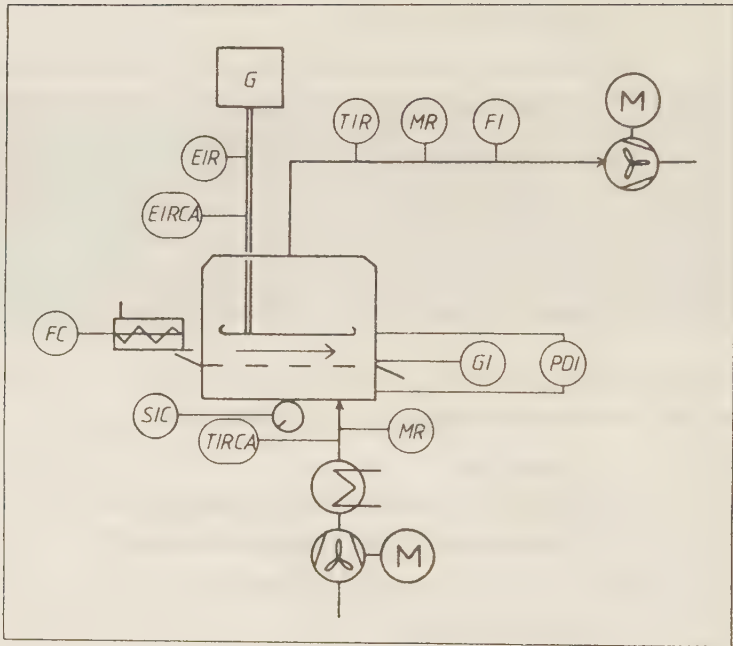


Abb. 35: R I - Fließbild von Versuchsanlage II

der Sprung bei einem der Parameter hat eine sofortige Antwort in Form eines Sprunges bei allen anderen zur Folge. Im Versuch äußert sich ein Sollwert-Sprung ohne Veränderung der anderen Variablen in dem höheren Feuchtigkeitsgehalt des Granulates. In Versuchen muß der Bereich ermittelt werden, innerhalb dessen die Parameter variiert werden können, ohne das Trocknungsergebnis in Frage zu stellen.

4.2.3 Vorversuche

In 12 Vorversuchen wurde der Apparat auf seine Funktionsfähigkeit geprüft. Nachdem die neuartige Konstruktion, die auf dem Reißbrett entstanden war, in Betrieb genommen wurde, ergaben sich am Trockner eine Reihe von Schwachstellen, die beseitigt werden mußten. Der Dosier-

ung des Feuchtgranulates in den Trockner kommt im kontinuierlichen Verfahren eine große Bedeutung zu, da von ihr wesentlich die Stabilität der stationären Betriebsphase abhängt. In Abbildung 36 wird durch eine Schemazeichnung dargestellt, wie die aus Dosiergerät, Granulator und Trockner bestehende Kombination funktionell angeordnet ist, sodaß ein kontinuierlicher Betrieb mit konstantem Granulatdurchsatz gewährleistet war.

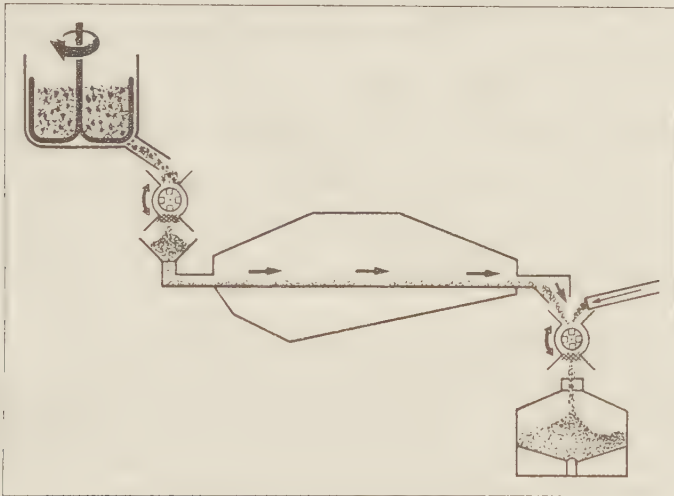


Abb. 36: Funktionsdarstellung von Dosiergerät, Granulator und Trockner

4.2.3.1 Versuche zur Abstimmung des Arbeitsschwingkreises

Bei den ersten Abstimmungsversuchen konnte das Feuchtgranulat noch nicht kontinuierlich dosiert werden. Schwankungen in der Schichtdicke von ± 5 mm waren dabei nicht zu vermeiden. Gleichzeitig ermöglichen jedoch die Schwankungen in der Granulatzufuhr Schlüsse hinsichtlich der Auswirkungen des sich verändernden Luftspaltes d_1 auf die Leistungsaufnahme.

Für die Ermittlung des Wirkungsgrades des Apparates sowie die Auswertung der Versuchsergebnisse ist es in Anbetracht der ständig schwankenden Schichtdicke sinnvoll, eine mittlere Schichtdicke zu verwenden. Diese wurde aus dem Ansatzvolumen der Durchlaufzeit (=Prozeßdauer) sowie der sich für die betreffende Antriebsposition sich ergebenden Verweilzeit erhalten.

d_2 kann mit Hilfe der folgenden Beziehungen erhalten werden:

$$\bar{V} = L b \bar{d}_2; \quad (59)$$

$$\dot{m} = \frac{\bar{V} \rho}{\tau} = \bar{V} \rho; \quad (60)$$

$$M = \bar{V} \rho t = \frac{L b \bar{d}_2 \rho t}{\tau}; \quad (61)$$

$$\bar{d}_2 = \frac{M \tau}{L b \rho t}; \quad (62)$$

t = Versuchsdauer

M = gesamte durchgesetzte Masse

Der mittleren Schichtdicke entspricht eine mittlere Leistungsaufnahme. Das Integral der Leistungsaufnahme wird durch die Versuchszeit dividiert und der mittleren Schichtdicke zugeordnet.

Zur Elimination der Schwankungen der Leistungsaufnahme des Trockners wird eine mittlere Leistungsaufnahme nach folgender Gleichung definiert:

$$P = \frac{\sum P_i t_i}{t_{\text{ges}}} \quad (63)$$

Dabei wird dem Index i die jeweilige Phase markiert, innerhalb derer die Leistung konstant den gleichen Wert beibehält. Für den Fall einer schaufelweisen Gutzuführung ist die Zeitspanne i so lange, wie der Ausschlag des Leistungsmessers als Reaktion auf die Veränderung des Di-

elektrikums andauert,

Ziel der Versuche ist es, den gegenseitigen Einfluß von Schichtdicke, Elektrodenabstand und Leistungsaufnahme zu untersuchen und eine Optimaleinstellung zu finden, bei der der Apparat eine befriedigende Trocknungsleistung erbringt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle V im Anhang aufgeführt.

Die Dichte der Schüttung ist abhängig vom Feuchtegehalt sowie vom Fluidisierungsgrad der Wirbelschicht. Sie nimmt mit zunehmendem Trocknungsfortschritt ab, sodaß eine mittlere Dichte $\bar{\rho}$ in die Gleichungen (59) - (61) eingesetzt werden muß.

4.2.3.2 Ermittlung der Optimaleinstellung des Arbeitsschwingkreises

Wie aus Tabelle VIII entnommen werden kann, steigt die Leistungsaufnahme mit der Schichtdicke d_2 an. Bei absatzweisem Betrieb ist die Höhe der spezifischen Leistungsaufnahme ein Indikator für den Restfeuchtegehalt des Gutes.

Bei sonst identischen Ausgangsbedingungen bestimmt der Elektrodenabstand die Niveauhöhe der maximalen Leistungsaufnahme, d.h. das Resonanzverhalten des Arbeitsschwingkreises. Parallel dazu wird die Leistungsaufnahme von der Ausgangsfeuchte des Granulates beeinflusst, das bedeutet, daß die Abstimmung produktespezifisch erfolgen muß.

In Abbildung 37 ist ein dimensionsloser Quotient aus Schichtdicke d_2 und dem Elektrodenabstand d über der HF-Leistung P aufgetragen. Für verschiedene Elektrodenabstände wurde eine Funktion der Schichtdicke und der Leistungsaufnahme ermittelt. Bei allen Versuchen war die Ausgangsfeuchtigkeit gleich, die durchschnittliche Verweilzeit betrug ca. 75 s, die mittlere Abnahme der Feuchtigkeit des Versuchsgranulates lag bei 6,5% für alle Versuchsreihen. Mit dem Quotienten D blieb bei allen Schichtdicken d_2 die Leistungsaufnahme im Bereich bis $D = 0,5$ weitgehend konstant. Bei einer Luftspaltbreite, die mindestens die Distanz des halben Elektrodenabstandes beträgt, ist infolge der Inhomogenität des Feldes

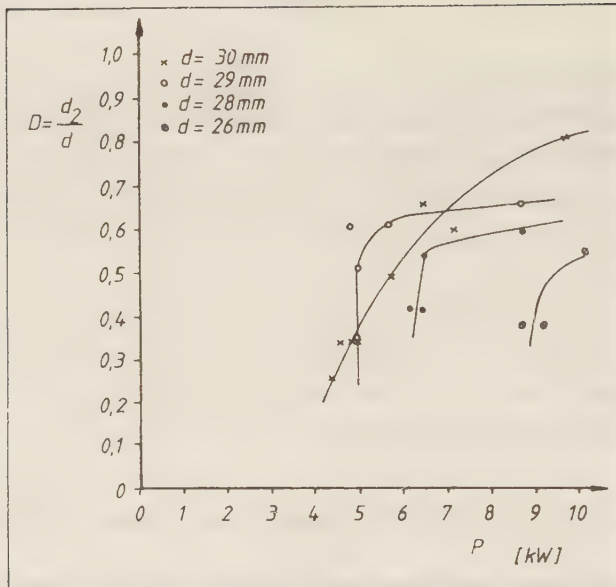


Abb. 37: Korrelation von Elektrodenabstand und Hochfrequenz-Leistung bei Granulat A (Vibration wirkt in, Luftströmung entgegen der Transportrichtung)

keine Veränderung durch Variation der Luftspaltbreite festzustellen. Der Arbeitsschwingkreis besteht zum wesentlichen Teil aus den Elektroden und dem dazwischen befindlichen Gut in der Funktion eines elektrischen Kondensators. Die Abstimmung der Frequenz des Arbeitsschwingkreises wird durch den Elektrodenabstand in Bezug auf das Dielektrikum vorgenommen. Über einen bestimmten Bereich des Elektrodenabstandes befindet sich der Arbeitsschwingkreis in Abhängigkeit des Dielektrikums, d. h. in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und Feuchtigkeit des Trocknungsgutes in Resonanz zu dem Generator als Primärkreis. In diesem Zustand überträgt der Arbeitsschwingkreis maximale Leistung. Gleichzeitig reagiert er im Resonanzzustand empfindlich auf jede Änderung der Schichtdicke. In Abb. 37 wird gezeigt, daß bei einem bestimmten Verhältnis von d_1 zu d_2 die Leistungsaufnahme maximal wird. Das abweichende Verhalten der 30-mm-Schicht ist auf Inhomogenitäten des HF-Feldes zurückzuführen.

Die Versuchsergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

- zur Erreichung optimaler Resonanz muß mit dem Elektrodenabstand auch die Schichtdicke vergrößert werden, d.h. die Trocknungsgeschwindigkeit, die sich proportional zur Leistungsaufnahme verhält, wird bei großem Elektrodenabstand nur mit großer Schichtdicke des Feuchtgranulates maximal
- je kleiner der Elektrodenabstand ist, desto empfindlicher reagiert der Arbeitsschwingkreis – innerhalb eines bestimmten Bereiches – auf geringfügige Veränderungen des Dielektrikums.
- mit steigender Schichtdicke nimmt die Leistungsaufnahme zu, wobei aber der Elektrodenabstand im Verhältnis zur Schichtdicke so eingestellt werden muß, daß eine bestimmte Breite des Luftspaltes nicht unterschritten wird. Ein bestimmter Luftspalt zwischen der Gutoberfläche und der Elektrode ist aus Gründen der elektrischen Resonanz, der Brüdenabfuhr und zur Einstellung einer genügend hohen Elektrodenspannung ohne Stromüberschläge notwendig.
- die Höhe der Leistungsaufnahme stellt ein Maß für die Ausgangsfeuchte des Granulates dar.

4.2.4 Versuchsdaten

4.2.4.1 Leistungsantwort auf die Art der Feuchtdosierung

Der Zustand des Dielektrikums ist direkt für die von den Elektroden abgegebene Leistung verantwortlich. Die Leistungsaufnahme bei zwei extremen Arten der Feuchtgutdosierung werden in Abb. 38 gezeigt. Die übrigen Eintragsarten des Granulates liegen in der Charakteristik der Leistungsantwort dazwischen.

Wird das Gut von Hand mit einer Schaufel zugegeben, so findet sich die Frequenz der Schaufelentleerungen in der Kurve der Leistungsaufnahme wieder. Die Form des Signals hängt dabei von folgenden Parametern ab:

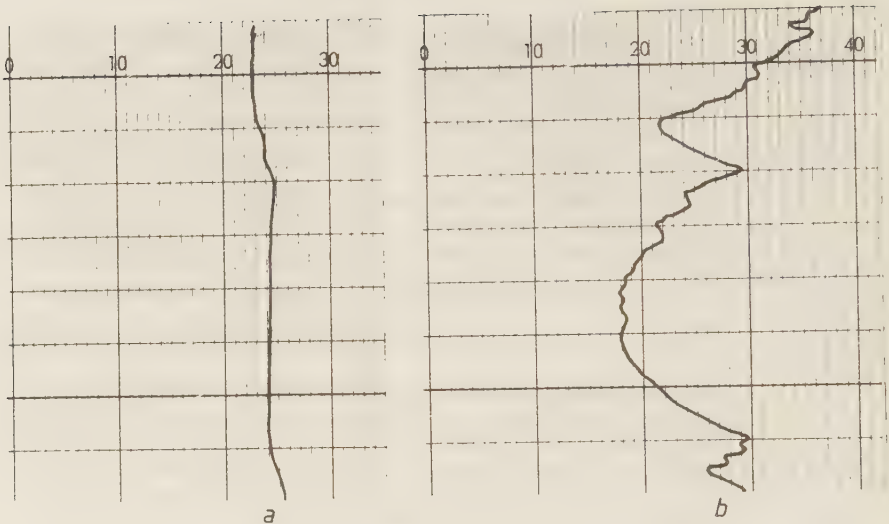


Abb. 38: Leistungsaufnahme (in % der Maximalleistung)
a) bei Zugabe einiger Schaufeln Feuchtgranulat
b) bei kontinuierlicher Dosierung mittels Granulator

- Feuchte des Granulates
- Kornspektrum
- Schaufelinhalt und Entleerungsgeschwindigkeit
- bestehende Schichtdicke

Die Leistungskurve kann in Blindleistung und Arbeitsleistung eingeteilt werden. 10–15% der verfügbaren Gesamtleistung sind als Blindleistung anzusprechen. Es ist die Leistung, die im An- und Abfahrzustand des Trockners gemessen wird. Der darauffolgende Bereich kann als Arbeitsbereich bezeichnet werden. Wenn Wasser enthaltendes Schüttgut das Hochfrequenzfeld erreicht, steigt die Leistungsaufnahme über den Wert der Blindleistung an. Die Erhöhung der Leistungsaufnahme ist dabei der im HF-Feld befindlichen Wassermasse proportional. Die Peaks kennzeichnen Schwankungen in der Dosierung des Granulates, die Änderungen der

Schichtdicke zur Folge haben.

Bei kontinuierlicher Dosierung mittels Granulator ist der Gleichmäßigkeit der Feuchtgutzugabe entsprechend eine gleichmäßige Leistungsaufnahme festzustellen.

In den Abbildungen 39 und 40 ist die Leistungsaufnahme bei kontinuierlicher und zusätzlich schaufelweiser Gutzugabe dargestellt. Die Leistungsaufnahme spiegelt die im Hochfrequenzfeld befindliche Feuchtigkeitsmenge wieder. Gleichzeitig ist die Blindleistung eingetragen. Eine absolut gleichbleibende kontinuierliche Dosierung erzeugt konstante Elektrodenspannung, Leistungsaufnahme und Restfeuchte. Sobald der Massenstrom des Feuchtgranulates erhöht wird, steigen Leistungsaufnahme und Spannung.

Die Restfeuchte des getrockneten Granulates betrug im ausschließlich kontinuierlich dosierten Versuchsabschnitt 1,8%, im Abschnitt mit der zusätzlich schaufelweisen Dosierung, d.h. mit der erhöhten Schichtdicke 2%.

Mit Hilfe der Gleichungen (1) - (4) kann aus den in Abbildung 40 wiedergegebenen Daten der Dielektrizitätskoeffizient des Gutes im Hochfrequenzfeld ermittelt werden.

Für verschiedene feuchte Granulate wurden folgende Werte beobachtet:

Granulattyp	Wassergehalt	ϵ_s'
Granulat A	16 %	12,5
Granulat C	10 %	5,0

Tabelle 6: Dielektrizitätskoeffizienten in Abhängigkeit vom Wassergehalt

In beiden Versuchsabschnitten hatte die Art der Dosierung sowie die Schwankungen des Massenstromes am Granulat und damit der Schichtdicke bei konstanter Verweilzeit keinen Einfluß auf die Restfeuchte.

In Abbildung 41 sind Leistungsaufnahme, Spannung und Temperatur von Zu- und Abluft bei kontinuierlich und absatzweiser Dosierung einander gegenübergestellt. Man sieht, daß die kontinuierliche Dosierung zu kon-

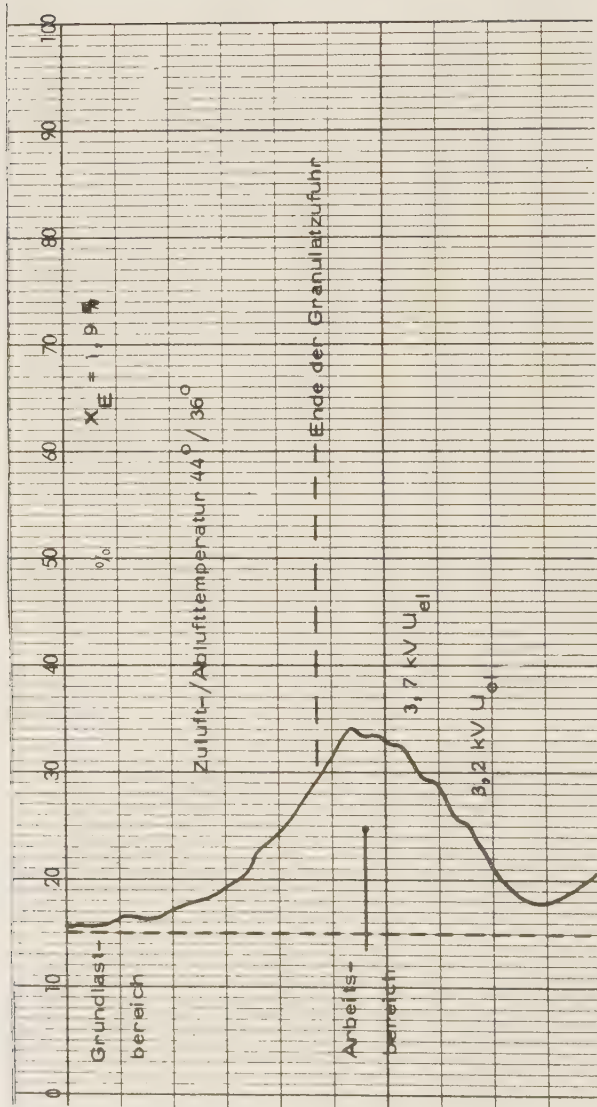


Abb. 39: Dokumentation der Leistungsaufnahme mit Definition der 3 Leistungsbereiche (schaufelweises Feeding)

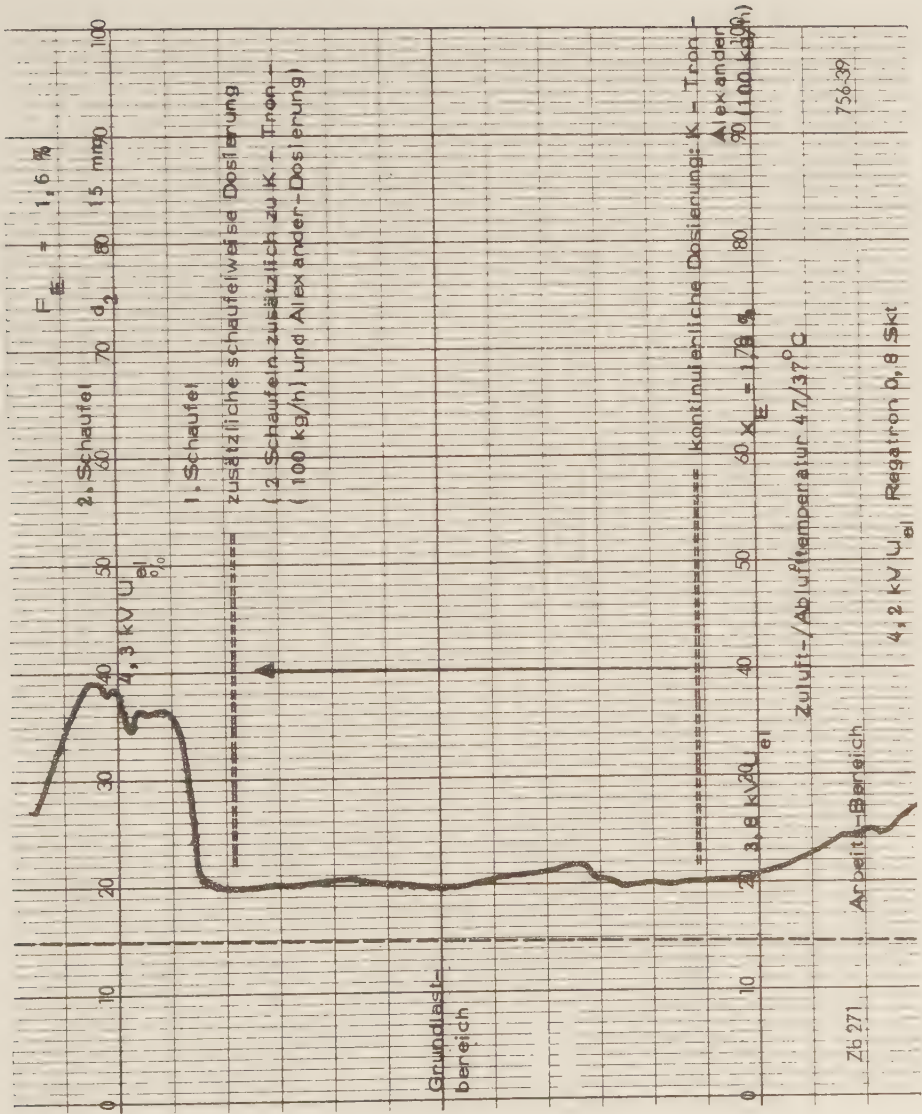


Abb.40: Dokumentation der Leistungsaufnahme mit Definition der 3 Leistungsbereiche (schaufelweises Feeding)

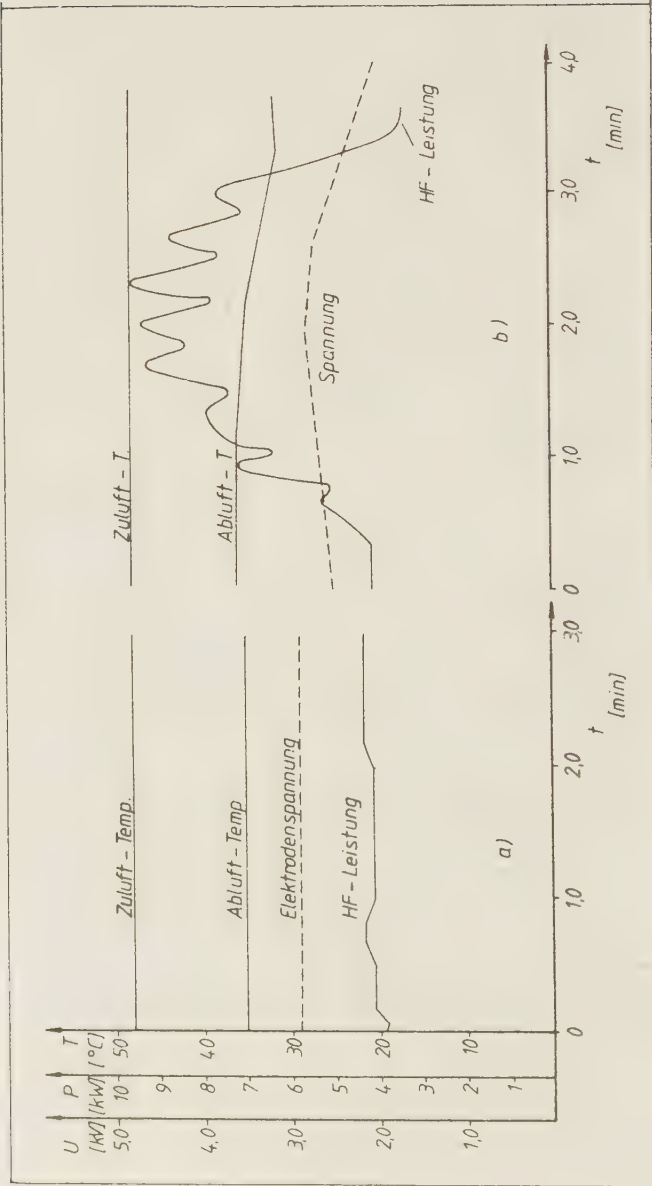


Abb. 41: Leistungsaufnahme als Funktion der Zeit bei verschiedenen Arten der Feuchtigkeitsdosierung kontinuierlich (a), absatzweise (b)

stanten Betriebsbedingungen führt. Unregelmäßige Dosierung führt zu großen Schwankungen in der Leistungsaufnahme und zu Änderungen in der Elektrodenspannung. Die Höhe der Peaks in der Leistungsaufnahme geben über die Größe und die Frequenz der Schwankungen in der Gutzufuhr Auskunft. Im Vergleich zur rein kontinuierlichen Dosierung mußte die Elektrodenspannung reduziert werden, da mit der Leistung die Spannung sehr stark und schnell anstieg und somit bei jeder Schaufelentleerung die Gefahr eines Stromüberschlages zwischen Elektrode und Siebboden bestand.

4.2.4.2 Leistungsaufnahme des Festbettes

Zur Messung der Leistungsaufnahme am Hochfrequenztrockner wurde bei konstanter Dosierung durch Zuschalten der Vibration eine homogene Verteilung des auf 15% Wassergehalt angefeuchtetem Material vom Präparatetyp A hergestellt. Nach Abschaltung des Vibrationsantriebes war ein Festbett entstanden dessen Kornverteilung wie in Abbildung 42 dargestellt, ein Spektrum an Granulendurchmessern von 40 µm bis 3 mm aufwies.

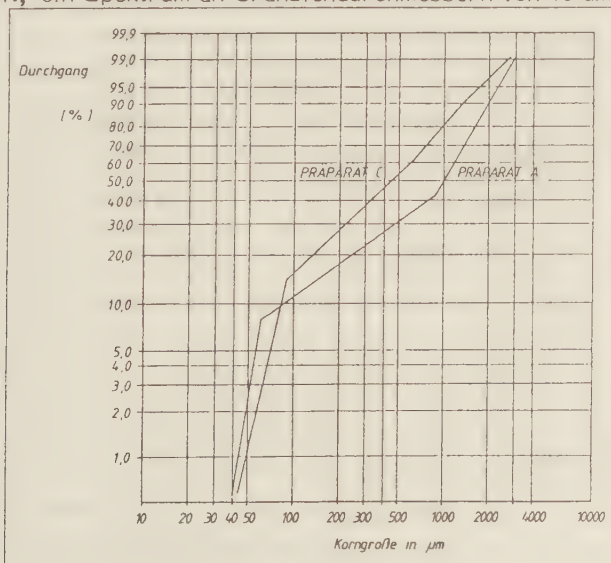


Abb. 42: Korngrößenverteilung von Feuchtgranulaten nach dem RRSB-Netz

Dieses Festbett (und die in den nächsten Versuchen folgenden identisch hergestellten) wurde den Leistungsmessungen zugrunde gelegt. Gleichzeitig wurden Messungen von Feuchtegehalt und Granulattemperatur ausgeführt. Diese wurden wegen des Störeinflusses der Hochfrequenzstrahlung auf die Meßelektronik nach Probenentnahme mittels eines schnellen Mantelthermoelementes außerhalb des Trockners gemessen. Die Schichtdicke wurde bei jeder neuen Schüttung konstant auf 24 mm eingestellt. Das Volumen des Granulates auf der gesamten Siebfläche war $1,18 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, das entspricht einem Gewicht von ca. 6,5 kg Feuchtgranulat, d.h. im Hochfrequenzfeld befanden sich 0,98 kg Wasser.

Das Totvolumen am Ein- und Auslauf des Trockners kann gegenüber dem gesamten Schüttvolumen vernachlässigt werden.

Aus der Darstellung der Versuchsergebnisse in Abb. 41 und 42 läßt sich entnehmen, daß in einem stationären, nicht von Luft durchströmten Granulatbett mit der Temperatur des Produktes auch die Leistungsaufnahme im Hochfrequenzfeld steigt. Da die Brüden aus dem Hochfrequenzfeld durch Konvektion abgeführt werden, nimmt der Feuchtegehalt ab.

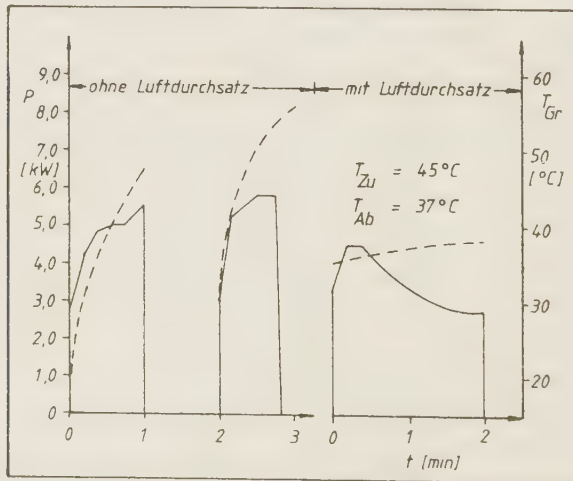


Abb. 43: Leistungsaufnahme und Granulattemperatur mit und ohne Luftdurchsatz bei konstanter Schichtdicke (P — T ----)

In einem anderen Versuch mit gleicher Anordnung wurde permanent Luft durch die Schüttung geblasen. Wenn das Granulatbett von Luft durchströmt wird, bleibt T_{Gr} nahezu konstant und die Leistungsaufnahme fällt mit zunehmender Trocknung ab.

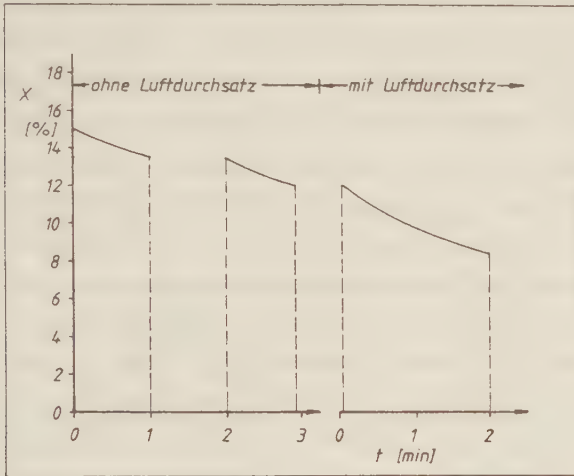


Abb.44: Verlauf des Feuchtigkeitsgehaltes mit und ohne Luftdurchsatz bei konstanter Schichtdicke

Bei diesen Messungen kann nicht von einer Wirbelschicht gesprochen werden, da die Luftgeschwindigkeit unterhalb des Lockerungspunktes blieb.

Die Gegenüberstellung beider Versuche zeigt auf deutliche Weise, daß der geschwindigkeitslimitierende Schritt der Trocknung im Transport der Brüden aus dem Zentrum der Schüttung an die Oberfläche besteht. Bei Luftdurchsatz wurde eine wesentlich höhere Trocknungsgeschwindigkeit erzielt. Die nicht aus der Schüttung mittels Luft ausgetriebenen Brüden benötigen eine erhebliche Zeit um die Barriere zu überwinden. Der Vergleich von den Abb.43 und 44 zeigt, daß die Kurven der Leistungsaufnahme nur dann einen trocknungsähnlichen Verlauf nehmen, wenn die Schüttungen luftdurchströmt sind. Da die Leistungsaufnahme propor-

tional zum Dielektrizitätskoeffizienten ist, stellt sie ein Maß für den Restfeuchtegehalt dar. Die Trocknungsverläufe flachen in beiden Abbildungen ab und zeigen, daß die Oberflächenfeuchte weitgehend verdunstet ist. Das Granulat enthält am Endpunkt der Kurve noch soviel Feuchte (ca. 9% bei 15% Ausgangsfeuchte), daß nur der an der Oberfläche, nicht jedoch der im Inneren der Schüttung befindliche Wasseranteil verdunstet sein kann.

Im Inneren der Schüttung enthält die Luftphase Wasserdampf bis zum Gleichgewichtsdampfdruck, der infolge des Transportwiderstandes nicht aus der Schüttung entweichen kann. Die im Dampf enthaltenen Wassermoleküle bleiben Rezeptoren für die hochfrequente Strahlung, sodaß die Temperatur im Granulat und damit der Dampfdruck weiter steigt. Mit höherem Dampfdruck überwinden mehr Moleküle den Transportwiderstand und gehen in die gasförmige Umgebung über. Je weniger Wasser jedoch in der Schüttung enthalten ist, desto weniger Leistung kann aufgenommen werden. Damit wird sehr schnell ein Gleichgewichtszustand erreicht, bei dem die Trocknung keine weitere Fortschritte mehr macht. Diese Effekte können zur Wassergehaltsbestimmung ausgenutzt werden. Bei diesen Versuchen wurde erstmals deutlich, daß bei ansonst gleichen Voraussetzungen eine Korrelation zwischen verschiedenen Feuchtegehalten und den dazugehörigen Werten für die Leistungsaufnahme besteht. Diese Erkenntnis wurde auch durch andere Untersuchungen /44/ bestätigt. Die Bestimmung basiert dabei auf der Messung der Absorption von Mikrowellenenergie, einer Hochfrequenzstrahlung kurzweiliger Art. Die Messung wird als zerstörungsfrei und trägheitslos beschrieben. Materialien mit einem hohen dielektrischen Verlust beeinflussen das Mikrowellenfeld stark und erschweren die Messung.

4.2.4.3 Fließverhalten des Granulates in Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz

Wie bereits in Abschnitt 4.1.6 beschrieben, erzeugt die Vibration eine Wirbelschicht auf dem Siebboden, die von dem gerichteten Luftstrom

in ihrer Expansion unterstützt wird. Die Entstehung der Wirbelschicht ist von der Drehzahl des Vibrationsantriebes abhängig. Bei Veränderung der Drehzahl von kleinen zu großen Frequenzen ändert sich der Zustand und der Strömungswiderstand der Schüttung. Bis zu einer bestimmten Drehzahl ist keine Einwirkung auf die Schüttung festzustellen. Beim vorhandenen Apparat werden innerhalb eines kleinen Bereiches, der im Frequenzband von 980 bis 1076 U/Minute der Unwuchtwellenfrequenz zu liegen kommt verschiedene Zustände durchlaufen. In Tabelle 7 sind die einzelnen Zustände den dazugehörigen Frequenzen zugeordnet:

Zustand der Schüttung	$\omega = 2 f_{\text{Err}} \pi$
Fließbett	1050 - 1070
Fließbett mit verkürzter Verweilzeit	1070 - 1085
Wirbelschicht ($h_L = 15 \text{ mm}$)	1085 - 1130
expandierte Wirbelschicht ($h_L = 30 \text{ mm}$)	1130 - 1155

Tabelle 7: Zustand der Schüttung in Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz

Gemäß Abschnitt 4.1.6 wurde zur Reduzierung der Transportgeschwindigkeit bei maximaler Erregerkraft der Wurfinkel klein gewählt. Damit ist eine kleine Amplitude gegeben. Der optimale Betriebspunkt der Vibrationswirbelschicht ergab sich bei folgenden Werten:

$$\begin{array}{lll}
 m_o = 6,6 \text{ kg} & r = 0,031 \text{ m} & \beta = 8,5^\circ \\
 f_{\text{Err}} = 178 \text{ Hz} & \omega = 1120 \text{ Hz} & G = 1 \text{ mm}
 \end{array}$$

Nach Gleichung (47) ergibt sich damit die Maschinenkonstante zu

$$K = 128$$

Dabei wurde der Wurfwinkel β nach der maximalen Amplitude ermittelt. Infolge der hohen Vibrationsfrequenz sank die Amplitude. Die zur Ab-

lösung des schweren, feuchten Granulates sowie zur Überwindung der Klebekräfte notwendige Erregerkraft ist nach Gleichung (56)

$$F_o = \omega^2 m_o r_o = 2,56 \cdot 10^5 \text{ N}$$

Für die theoretische minimale und maximale Rinnengeschwindigkeit ergibt sich:

$$v_{h,min} = 0,15 \text{ m/s}$$

$$v_{h,max} = 1,0 \text{ m/s}$$

Nicht berücksichtigt ist dabei die gegensinnige, bzw. gleichsinnige Luftströmung zur Transportrichtung über dem Conidur-Boden, sowie die spezifischen Granulateigenschaften des Feuchtmaterials.

Bei Versuchen mit Granulat A und einer gegensinnigen Luftgeschwindigkeit von 0,3 m/s wurde die maximale Transportgeschwindigkeit 0,02 m/s die minimale zu 0,015 m/s ermittelt. Bei gleichsinniger Strömung wurde die maximale Transportgeschwindigkeit zu 0,075 m/s, die minimale zu 0,047 m/s ermittelt.

Für die Korrelation zwischen den errechneten und den gemessenen gegensinnigen Rinnengeschwindigkeiten kann geschrieben werden:

$$v_{h,min} = v_{h,min} t_{K_{gg}} = 0,015 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{h,max} = v_{h,max} t_{K_{gg}} = 0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Analoge Korrekturfaktoren gelten auch für gleichsinnige Luftströmung. Bei der Erhaltung dieser Transportgeschwindigkeit ist die Erzeugung einer stabilen kontinuierlichen Wirbelschicht gewährleistet und damit die Voraussetzung für die angestrebte Trocknungsgeschwindigkeit geschaffen.

In einer Vektorendarstellung in Abbildung 45 wird gezeigt, welche Aus-

wirkungen die verschiedenen Kombinationen der Komponenten Luft und Vibration auf die Granülen haben.

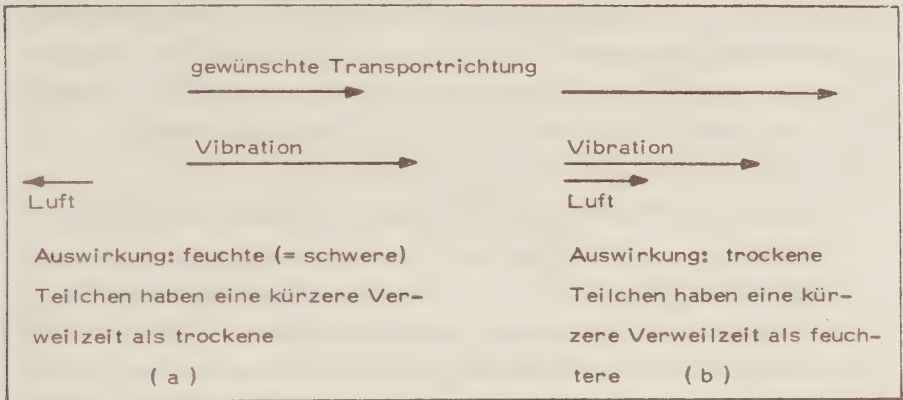


Abb.45: Darstellung der Kombinationen bei gleich- oder gegensinnig zur Vibration gerichteter Luftströmung. Die Kräfteverteilung bewirkt, daß die durchschnittliche Verweilzeit bei a) länger als bei b) ist.

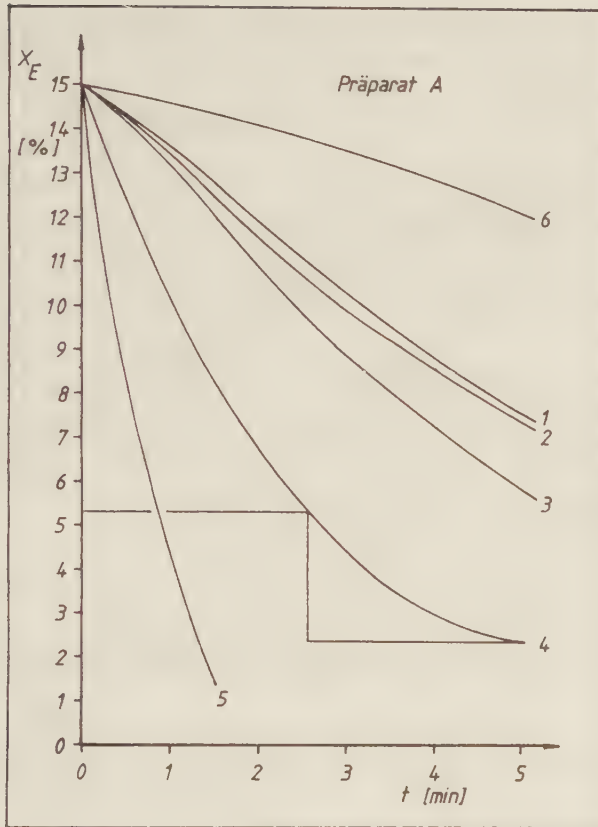
4.2.4.4 Einfluß der Fluidisierung auf den Trocknungsverlauf und die Guttemperatur bei gegensinniger Luftströmung

Die bei der Hochfrequenztrocknung auftretenden Phänomene werden von Krischer /45/ dahingehend beschrieben, daß die Temperatur im Inneren des Gutes höher liegt als die am Rand der Granüle. Ohne Luftdurchsatz d.h. ohne Fluidisierung der Granülen im Hochfrequenzfeld steigen Innen- wie Oberflächentemperatur gleichmäßig an, bis die Siedetemperatur erreicht wird, wobei dies im Zentrum der Granüle früher der Fall ist als an der Außenhaut. Die Verdampfungstemperatur des Wassers entspricht der Siedetemperatur. Bei kurzer Einwirkungszeit der Hochfrequenz findet nur eine begrenzte Wärmeübertragung in der Granüle statt. Innerhalb einer festen Schüttung ist die Diffusion stark behindert und bremst die Trocknungsgeschwindigkeit.

Mit zunehmender Fluidisierung sinkt die Guttemperatur, da durch die Luftumspülung der Granülen in einer beschleunigten Verdunstung die entstehende Wärme durch die Verdampfungsenthalpie abgezogen wird. Die

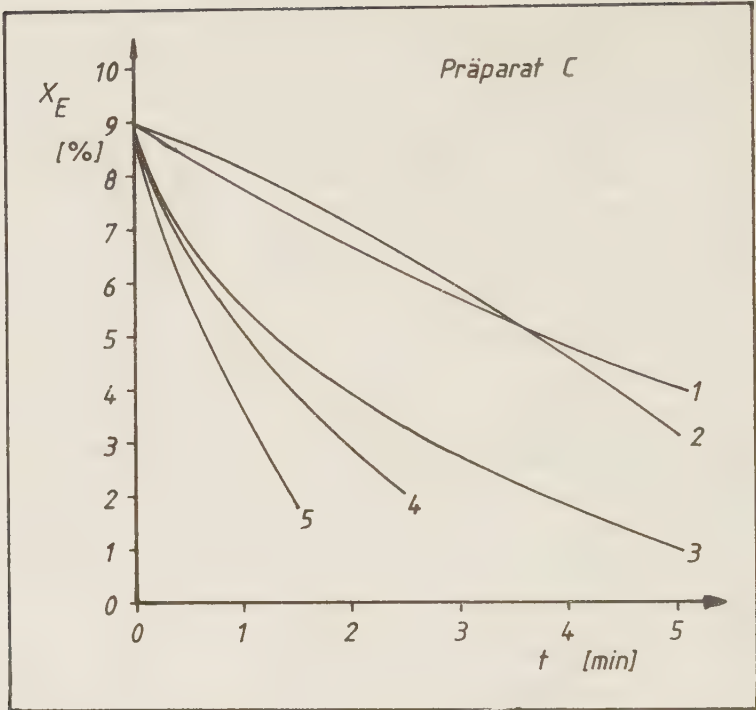
im Zentrum der Granule entstehende Wärme verteilt sich durch den Temperaturgradienten über Wärmeleitung im Gut zwischen innen und außen rasch. Wie eng die Effektivität der Hochfrequenz Trocknung mit der Fluidisierung des zu trocknenden Gutes verknüpft ist, wurde im vorhergehenden Abschnitt dargestellt. Je intensiver die Luftumspülung der Granulen ist, desto höher ist die Trocknungsgeschwindigkeit. Wird der Luftdurchsatz über eine bestimmte Grenze hinaus gesteigert, so ist die weitere Verbesserung klein und wird unwirtschaftlich.

In Versuchen am Festbett, am Fließ-, und am kontinuierlichen Vibrationsfließbett wurde der Einfluß der Fluidisierung gemessen und mit den Trocknungsverläufen der herkömmlichen Technologien verglichen. Für zwei Präparate unterschiedlicher Anfangsfeuchtegehaltes sind in den Abbildungen 46 und 47 die prozentualen Gehalte an Wasser über der Trocknungszeit aufgetragen. Die Trocknungsgeschwindigkeit der Granulate im Trockenschrank bei 105°C zeigt den gleichen Verlauf wie die des Festbettes innerhalb des Hochfrequenzfeldes, wenn dieses Festbett nicht von Luft durchströmt wird. Darauf nimmt auch die Anfangsfeuchte keinen Einfluß, wie beim Vergleich beider Abbildungen erkennbar wird. Dies war zu erwarten, da in beiden Fällen ausreichend Energie zur Verfügung stand. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.4.2 werden in den Abbildungen 46 und 47 dargestellt. Zur Bewertung der Trocknungsverläufe über der Zeit im Hochfrequenzfeld wurden für die jeweiligen Granulate die Trocknungsverläufe in anderen Trocknern aufgetragen. Der Vergleich der Kurven 2 und 3 in Abb.46 zeigt bei konstanter Schichtdicke den Einfluß der Durchströmung des Festbettes in Batch-Betrieb. Wenn das Festbett von Luft durchströmt wird, können die Brüden schneller die Schüttung verlasen. Durch Zuschalten des Vibrationsantriebes wird der Lockerungsgrad der Schüttung größer, sodaß eine intensive Durchmischung der das Bett durchströmenden Luft mit dem Gut stattfindet. Kurve 4 zeigt im Vergleich zu Kurve 3, daß die Trocknung bei diesen Betriebszuständen wesentlich beschleunigt werden kann. Bei konstanten Einstellungen des Luftdurchsatzes, der Vibrationsfrequenz und des Hochfrequenzfeldes kann durch Halbierung der Schichtdicke eine Verkürzung der Verweilzeit bis zum Erreichen der



- 1 konvektive Hordentrocknung (Trockenschrank 105°C), Masse 10 g, Schichtdicke 10 mm (Laborgerät zur Feuchtebestimmung)
- 2 Hochfrequenztroeknung, Festbett ohne Luftdurchsatz, Schichtdicke $d_2 = 25$ mm
- 3 Hochfrequenztroeknung, Festbett mit Luftdurchsatz, Zulufttemperatur 43°C, Schichtdicke $d_2 = 23$ mm
- 4 Hochfrequenztroeknung im kontinuierlichen Vibrationsfließbett mit Luftdurchsatz, Zulufttemperatur 65°C, $d_2 = 23$ mm, (2 Durchläufe)
- 5 Hochfrequenztroeknung im kontinuierlichen Vibrationsfließbett mit Luftdurchsatz, Zulufttemperatur 22°C, Durchsatz 100 kg/h, $d_2 = 12$ mm
- 6 Batch-Wirbelschichttroekner, Masse 15 kg, Zulufttemperatur 60°C

Abb.46: Trocknungsverläufe im Hochfrequenzfeld bei gegensinniger Luftströmung im Vergleich zu Trocknungsverläufen im Hordenschrank und im Batch - Wirbelschichttroekner



- 1 konvektive Hordentrocknung (Trockenschrank 105°C), Schichtdicke 10 mm (Laborgerät z. Feuchtebestimmung)
- 2 Hochfrequenz Trocknung, Festbett ohne Luftdurchsatz, Schichtdicke $d_2 = 12$ mm
- 3 Hochfrequenz Trocknung, Festbett mit Luftdurchsatz, Zulufttemperatur 16°C , Schichtdicke $d_2 = 12$ mm
- 4 Hochfrequenz Trocknung im kontinuierlichen Vibrationsfließbett mit Luftdurchsatz, Zulufttemperatur 20°C , $d_2 = 18$ mm
- 5 Hochfrequenz Trocknung im kontinuierlichen Vibrationsfließbett mit Luftdurchsatz, Zulufttemperatur 21°C , $d_2 = 10$ mm

Abb. 47: Trocknungsverläufe im Hochfrequenzfeld bei gleichsinniger Luftströmung im Vergleich zum Trocknungsverlauf im Hordentrockenschrank

gewünschten Restfeuchte auf ein Drittel erreicht werden, wie beim Vergleich der Kurven 4 und 5 festzustellen ist. Dieser Effekt überdeckt die Anhebung der Zulufttemperaturen von 22°C (Kurve 5) auf 43°C (Kurve 3) und 65°C (Kurve 4).

Bei der Schichtdicke von 23 mm sind für Präparat A 2 Durchläufe des Granulates zum Erreichen der geforderten Restfeuchte erforderlich. Der geringere Anfangsfeuchtegehalt von Präparat C führt bei den gleichen Versuchen zu einer Verschiebung der Restfeuchtegehalte zu kleineren Werten (Abb.47).

Da das Granulat C wegen des geringeren Wassergehaltes spezifisch leichter ist und bei den, der Kurve 3 zugrunde liegenden Versuchen eine niedrige Schichtdicke eingestellt war, war eine bessere Fluidisierung als bei dem unter Kurve 3 mit Granulat A dargestellten Versuchen festzustellen. Dies wird durch den größeren Unterschied des Restfeuchtegehaltes zwischen den Kurven 2 und 3 der Abb.47 ausgedrückt. Auch für Präparat C gilt, daß bei Verminderung der Schichtdicke die Verweilzeit bis zum Erreichen der geforderten Restfeuchte wesentlich verkürzt werden kann.

Die Verdoppelung der Schichtdicke bei Präparat A (Kurve 3 im Vergleich zu Kurve 5) wirkt sich zusätzlich diffusionshemmend auf die Trocknung aus. In den Versuchen wurde eine Strömungsgeschwindigkeit des Luftstromes durch die Schüttung von 0,30 m/s gemessen. Dieser Effekt überdeckt die Anhebung der Temperatur der Trocknungsluft von 22° auf 43°C .

In Abb.48 sind die Temperatur, die Feuchtigkeit des Gutes und die Leistungsaufnahme bei nichtdurchströmter und durchströmter Schüttungen gegenübergestellt. Besonders charakteristisch ist der große Temperaturunterschied. Während in der durchströmten Schüttung die Temperatur niedrig bleibt, steigt sie in der nichtdurchströmten an.

Der rasche Anstieg der Granulattemperatur bei nichtdurchströmter Schüttung weist auf folgende Vorgänge hin:

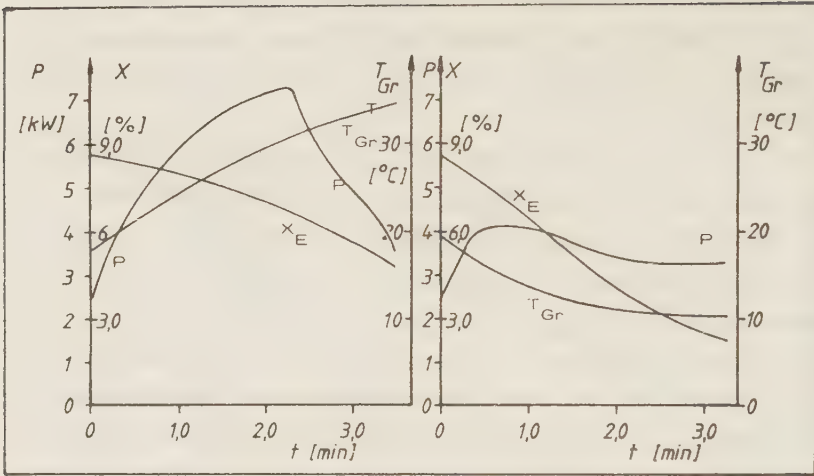


Abb. 48: Temperatur, Trocknungs- und Leistungsaufnahmeverhalten nichtdurchströmter (a) und durchströmter (b) Schüttungen von Präparat C im Hochfrequenzfeld (Luftstrom der Vibration und dem effektiven Guttransport entgegengerichtet)

1. Die durch Verdampfung entstandenen Brüden können aus der nichtdurchströmten Schüttung nur langsam entweichen.
2. Durch den sich nur langsam abbauenden Feuchtigkeitsgehalt besteht infolge des hohen Dielektrizitätskoeffizienten eine hohe Leistungsaufnahme, die zu einem hohen Temperaturanstieg führt.
3. Die Leistungsaufnahme steigt wegen der Temperaturerhöhung trotz des fallenden Feuchtegehaltes an oder bleibt zumindest konstant.

Wenn Luft durch das Granulatbett hindurchgeführt wird, können die Brüden mit der Luft entweichen und die Granulattemperatur sinkt infolge der Verdunstungskühlung. Abluft- und Granulattemperatur stimmten beim stationären durchströmten Bett nicht überein.

4.2.4.5 Einfluß der Fluidisierung auf den Trocknungsverlauf bei gleichsinniger Luftströmung

Bei dieser Betriebseinstellung des Trockners entsprechen Orientierung und Wirkung der durch die Vibration und die Luftströmung auf das Gut einwirkenden Kräfte den rechten Teil von Abb.45.

Wie bei Betrachtung der Kräfteverteilung zu erwarten ist, wird die Verweilzeit der Granülen bei gleichsinniger Betriebsweise gesenkt. Die Schichtdicke wird durch das, dem Trockner vorgeschaltete Dosiergerät in Abhängigkeit von der Verweilzeit bestimmt.

In Abb.49 sind die Trocknungsverläufe der Präparate A und C über der Verweilzeit bei gleichsinniger Luftführung dargestellt.

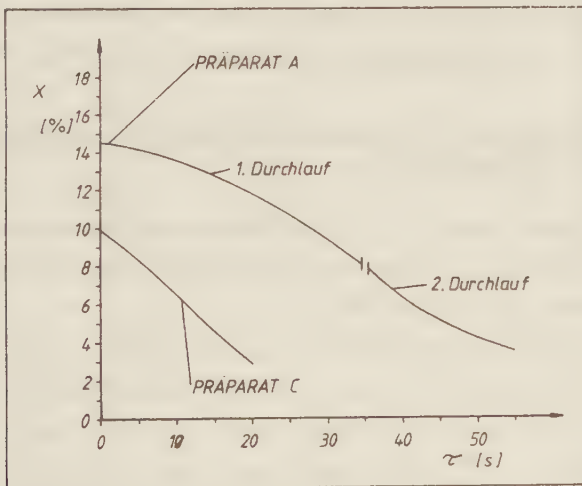


Abb.49: Trocknungsverläufe im Hochfrequenzfeld bei gleichsinniger Luftströmung, Präparate A und C, Fluidisierungsgeschwindigkeit durch den Siebboden 0,3 m/s, Zulufttemperatur 25 °C, Durchsatz 100 kg/h, Schichtdicke 5 - 8 mm

Wie bereits in Abschnitt 4.2.4.4 beschrieben, kann das Feuchtgranulat des Typs C leichter fluidisiert werden als das spezifisch schwerere von Präparat A. Dadurch ist die Einwirkung der gerichteten Luftströmung auf die Granülen stärker als bei Granulat A, bei dem die Fluidisierung durch Vibration weniger durch Luftstrom verstärkt wird. Daher ist die Verweilzeit im 1. Durchlauf länger als im 2. Durchlauf, bei dem die Granulateigenschaften von Präparat A ähnlich denen von Präparat C bei seiner Ausgangsfeuchte sind.

Die Versuche ergeben, daß in jedem Durchlauf bei den untersuchten Granulaten A und C eine Abnahme des Feuchtegehaltes von 14% auf 8%, bzw. von 9% auf 3% erreicht wird. Die Verweilzeit liegt bei gleichem Durchsatz pro Zeiteinheit im Vergleich zu der Betriebsweise mit gegen-sinniger Luftströmung erheblich niedriger. Die höheren Trocknungsgeschwindigkeiten sind auf die infolge niedriger Schichtdicken und in gleicher Richtung wirkende Kräfte bessere Fluidisierung zurückzuführen.

4.2.4.6 Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten gleich- und gegen-sinniger Luftströmung

In den Abbildungen 50 und 51 sind die Trocknungsgeschwindigkeiten für gleich- und gegensinnige Durchströmung der Schüttungen in Abhängigkeit vom Präparatetyp aufgetragen.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wird die Verweilzeit der Granülen im Falle gleichsinniger Durchströmung mit der Wirkungsrichtung der Vibration kürzer als bei gegensinniger. Unabhängig vom Produkt ist bei gegensinniger Durchströmung die Trocknungsgeschwindigkeit am Anfang maximal und sinkt stetig mit steigender Verweilzeit. Je höher die Anfangsfeuchte des Granulates ist, desto höher ist die anfängliche Trocknungsgeschwindigkeit.

Bei gleichsinniger Durchströmung steigt die Trocknungsgeschwindigkeit, ausgehend von einem bestimmten Wert an, um einem Maximum zuzustreben und danach abzusinken.

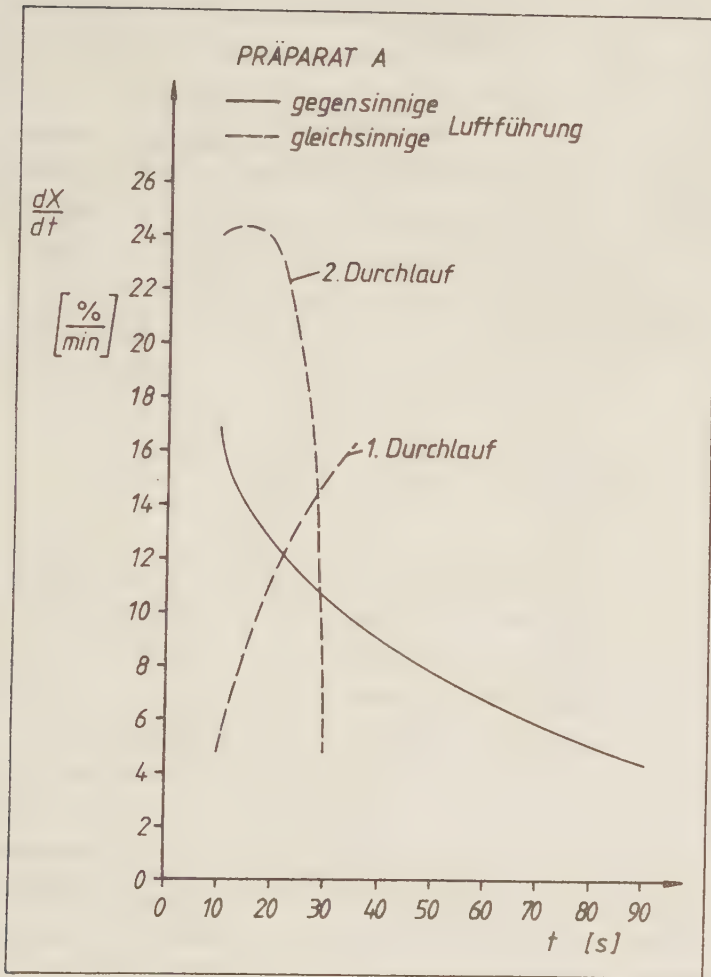


Abb. 50: Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten bei gleich- und gegensinniger Durchströmung von Präparat A

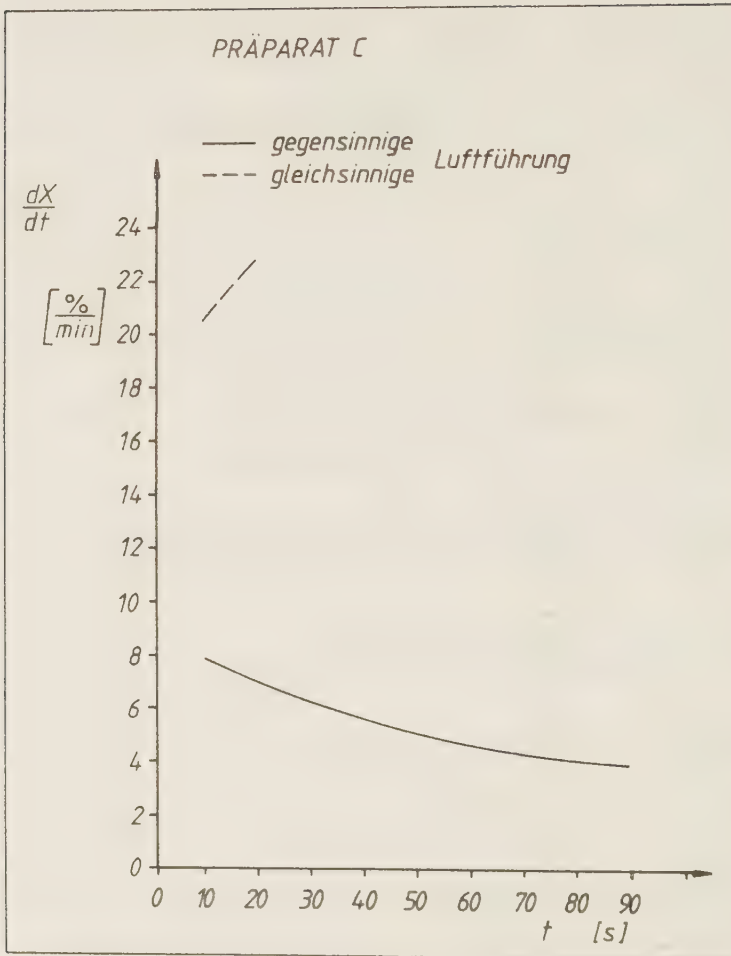


Abb. 51: Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten bei gleich- und gegensinniger Durchströmung von Präparat C

Wenn das Granulat unter gegensinniger Luftströmung getrocknet wird, findet infolge der größeren Schichtdicke eine größere Leistungsaufnahme statt, was sofort zu einer hohen Verdampfungsgeschwindigkeit führt, die mit sinkender Restfeuchte geringer wird.

Bei gleichsinniger Luftführung dagegen ist infolge der geringeren Schichtdicke die Leistungsaufnahme pro Zeiteinheit geringer, sodaß die Trocknung langsamer einsetzt.

Mit Gleichung (35) wird eine Wärme- und Stoffbilanz beschrieben, die unter der Annahme eines idealen Stoffübergangsverhaltens formuliert wurde. Wenn diese Gleichung umgeformt wird und die aus den Versuchen gewonnene Erkenntnis eingeführt wird, daß sich der Feuchtigkeitsgehalt während der Trocknung nach einer Exponentialfunktion verringert, so ergibt sich:

$$X = X_o' e^{-kt} = \frac{P}{\frac{dT}{dt} c_{P_{Gr}} m_{Gr}} - \frac{c_{P_L} m_L}{c_{P_{Gr}} m_{Gr}} \quad (64)$$

Legt man einer numerischen Lösung die Werte von Versuchen am Hochfrequenz Trockner zugrunde, so entstehen Antworten, die in Abb. 52 gezeigt werden. Die Versuche sind durch ein ausschließlich mit Luft fluidisiertes, nicht transportiertes Granulat bestimmt. Einen hohen Wert für die Leistungsaufnahme folgt ein schneller Temperaturanstieg.

Die Berechnung nach Gleichung (64) liefert eine, auf die Granulattemperatur bezogene Kurve, die sich an eine Basislinie der Hochfrequenzarbeit annähert. Diese Linie ist in ihrer Form abhängig von der Fluidisation der Schüttung. Im vorliegenden Fall wird ein luftdurchströmtes Festbett getrocknet. Unterlegt man dieser Parabel ein zweites Koordinatensystem, das den Feuchtigkeitsanteil im Produkt beschreibt, so kann die gleiche Kurve zur Beschreibung des Trocknungsverlaufes, bzw. der Trocknungsgeschwindigkeit dienen. Bei Eingabe der produktspezifischen Daten ist eine Vorausberechnung der erforderlichen Leistungsaufnahme, der Granulattemperatur sowie der Verweilzeit möglich. Wie jedoch eine

Kontrollberechnung gezeigt hat, lassen sich die spezifischen Daten des Granulates nur mit Hilfe von Korrekturfaktoren mit den in der Literatur aufgeführten Werten vergleichen. Offensichtlich treten noch andere wesentliche Vorgänge auf, die in der Gleichung nicht berücksichtigt sind.

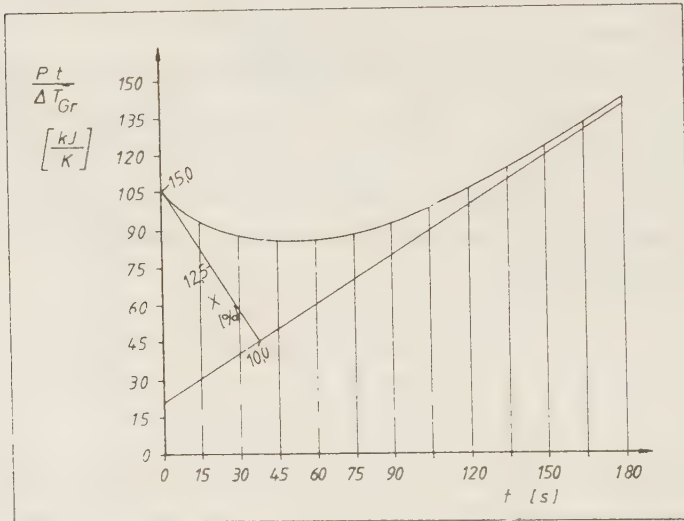


Abb.52: Darstellung der errechneten Trocknungswerte , basierend auf Versuchen mit Granulat A im Festbett

4.2.4.7 Zusammenhang zwischen Abluft- und Granulattemperatur

Die direkte Messung der Granulatoberflächentemperatur ist im Hochfrequenzfeld nicht möglich, da weder Flüssigkeitsthermometer noch Thermoelemente infolge der Strahlung in der Nähe des Gutbettes eine reproduzierbare Feststellung des Temperaturwertes ermöglichen. Um eine Bilanzierung der ins Gut eingebrachten Energien durchführen und am Feuchtegehalt des den Trockner verlassenden Granulates überprüfen zu können, wurden folgende Einflußgrößen gemessen:

- Zulufttemperatur
- Feuchte der Zuluft
- Ablufttemperatur
- Feuchte der Abluft
- Abluftvolumenstrom
- Granulatdurchsatz
- Hochfrequenzleistungsaufnahme
- Feuchtegehalt des Granulates nach der Trocknung

Es wurden Messungen am Quasifestbett durchgeführt, die in zeitlicher Abfolge die einzelnen Betriebszustände in der Reihenfolge kennenzulernen, wie sie eine diskrete Granüle während des kontinuierlichen Transportes in örtlicher Reihenfolge durch den Trockner durchläuft.

Alle Einflußgrößen bleiben über die Länge des Versuches konstant, die mit der Zuluft ins Gut eingebrachte Energie wird vernachlässigt.

Zur Messung der Granulattemperaturen wurden verschiedene Methoden angewendet. Infolge der geringen Wärmekapazität der Granülen schieden Flüssigkeitsthermometer aus. Toluol- oder Pentanthermometer konnten durch die mechanische Belastung nicht verwendet werden. Thermofarben ließen sich nicht in Granulate einarbeiten, andere Meßgeräte wie Pt-100-Systeme oder Infrarotdetektoren fielen wegen elektromagnetischer Induktion sofort aus. Mantelthermoelemente zeigten zwar eine geringe Trägheit der Messung, konnten jedoch im Apparat wegen fehlender Schutzmöglichkeit vor Überschlügen nicht installiert werden. Daher wurden Meßmethoden angewendet, die miteinander kombiniert wurden und auf diese Weise eine Abschätzung des Temperaturverlaufs längs des Siebbodens erlauben.

Es wurde die Temperatur des Granulates am Auslauf aus dem Trockner mittels eines Thermoelementes gemessen. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung zwischen der Abluft- und der Granulattemperatur gefunden. In Abb. 53 sind die am Produktauslauf gemessenen Granulattemperaturen den Ablufttemperaturen einander gegenüber gestellt. Die gefundene Übereinstimmung war unabhängig von der Art der Granulate.

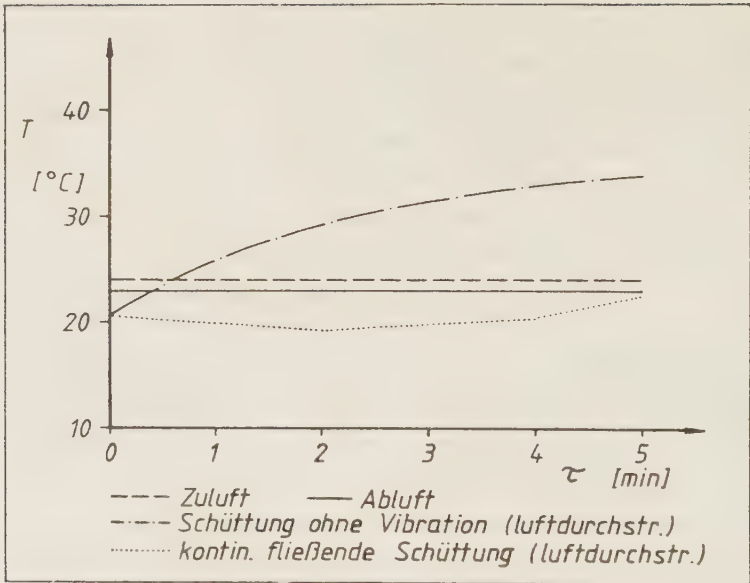


Abb. 53: Granulat- und Ablufttemperaturen im Vergleich (Präparate A und C)

Bei der zweiten Meßmethode wurde der Trockner im stationären Zustand abgeschaltet, sodaß mit der Hochfrequenz auch der Vibrationstransport und die Luftströmung sofort unterblieben. Es wurden Granulatproben an vier über die Länge des Trockners verteilten Orten gezogen und deren Temperatur bestimmt.

Die dritte Messung erfolgte bei einer, nicht durch Vibration fluidisierten Schüttung. Wie bei der vorhergehenden Meßmethode wurden Hochfrequenz und Luftstrom für die Zeit der Messung unterbrochen, die Messung erfolgte durch Probennahme über die Länge des Trockners.

Die Ergebnisse aus den Messungen nach der zweiten und dritten Methode sind in Abb. 54 gezeigt. In Kurve 2 ist eine errechnete Granulattemperatur aufgetragen. Die Temperaturwerte wurden dabei so ermittelt, daß die gemessene Leistungsaufnahme über einer bestimmten Zeiteinheit um den Enthalpiewert des verdampften Wassers (Probennahme von Granulat, Er-

mittlung der Feuchtigkeitsabnahme durch Messung im Trockenschrank) vermindert wurde. Unter der Annahme, daß der Restbetrag zur Temperaturerhöhung des Luftstromes und der Schüttung diene, wurde die Temperatur mit dem Masse- und dem spezifischen Wärmekapazitätswert gebildet.

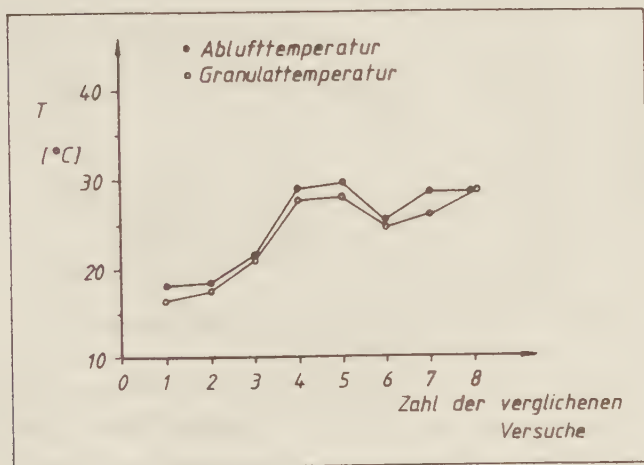


Abb. 54: Vergleich von Abluft- und Granulattemperaturen im luftdurchströmten Festbett

Wie bereits in den Abbildungen 46 und 47 dargestellt ist, hat eine Beheizung der Zuluft keine Auswirkungen auf den Trocknungsverlauf. Mit steigender Zulufttemperatur erhöht sich auch die Ablufttemperatur unabhängig von der Zusammensetzung des zu trocknenden Gutes. Da die Trocknungsgeschwindigkeit im Hochfrequenzfeld durch den Feuchtigkeitstransport in der Granüle limitiert wird, bewirkt die Erhöhung keine Verbesserung der Trocknungsgeschwindigkeit. Bei konstanter Verdunstungskühlung führt die Aufheizung der Zuluft zu einer steigenden Ablufttemperatur. In Abb. 55 sind Zuluft- und Ablufttemperatur einander gegenübergestellt. Die Verschiedenartigkeit der Präparate und die Richtung der Luftströmung zur Vibration haben keinen Einfluß auf die Darstellung.

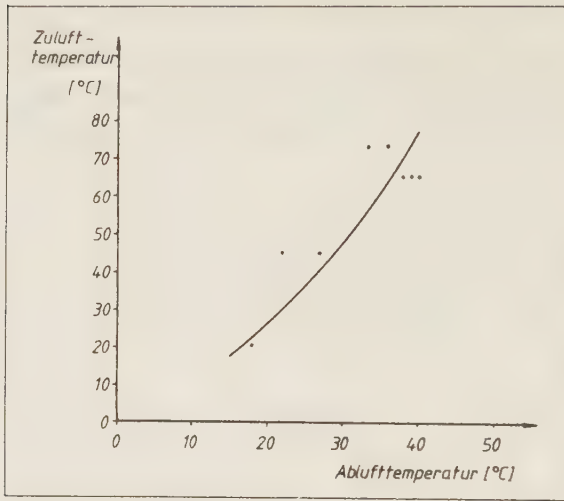


Abb. 55: Abhängigkeit der Abluft- von der Zulufttemperatur

Der Zustand der Zuluft bei Eintritt und der Abluft bei Austritt aus dem Trockner ist in das Mollier-Diagramm eingetragen (Abb. 56 für gegensinnige, Abb. 57 für gleichsinnige Luftströmung).

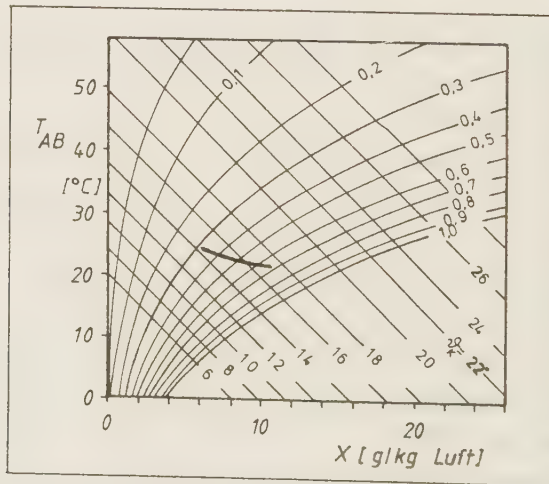


Abb. 56: Verlauf der Lufttemperatur und -feuchte im Vollastbetrieb bei einer Schichtdicke von 15 mm, $\tau = 100$ s, Luftströmung gegensinnig, Präparat A

Bei konvektiver Trocknung würde die Abkühlung der Luft entlang der Kühlgrenztemperatur erfolgen. Infolge der Hochfrequenzeinwirkung ist die Abluft gegenüber der bei ausschließlich konvektiver Trocknung erwärmt.

Die Meßpunkte beziehen sich auf den Zustand größter Energiedichte. Im folgenden Blockdiagramm sind die Differenzen der einzelnen Temperaturen einander gegenübergestellt.

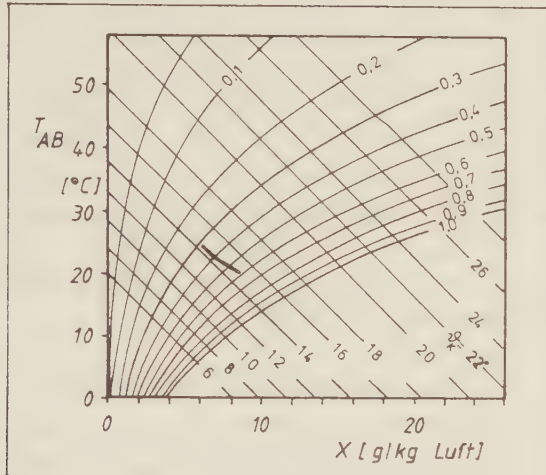


Abb. 57: Verlauf der Lufttemperatur und -feuchte im Vollastbetrieb bei einer Schichtdicke von 8 mm, $\tau = 35$ s, Luftströmung gegen-sinnig, Präparat A

Da die Feuchtigkeit im Anfangszustand homogen verteilt ist, setzt die Erwärmung des Wassers im Hochfrequenzfeld an jeder Stelle gleichzeitig ein. Es ist zu erwarten, daß die Temperatur im Zentrum des Granulats pellets infolge der langsamen Wärmeleitung und des hohen Transportwi-derstandes für das Wasser höher ist als die der Oberfläche, wo Ver-dunstungskühlung für einen schnellen Wärmeentzug sorgt. In zwei Ver-suchen wurden runde Granulatscheiben mit Durchmesser von 20 mm und Höhe 12 mm durch das Hochfrequenzfeld hindurchgeführt. Nach Verlas-

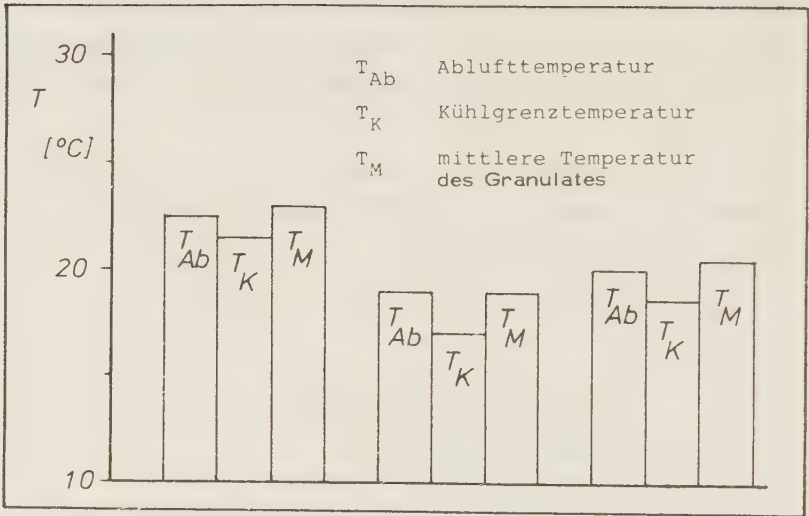


Abb. 58: Vergleich der Abluft- (T_{Ab}), über den Prozeß gemittelter (T_M) und der Kühlgrenztemperatur (T_K)

sen des Trockners wurden die Temperaturen längs des Durchmessers der Scheiben gemessen.

Nach einer Verweilzeit von 360s wurden folgende Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalte an folgenden Stellen gemessen:

	T_{Gr}	X
Oberfläche	37°C	4,7 %
Zentrum	66°C	7,2 %
Halbe Strecke Oberfl.-Zentrum	43°C	5,8 %

Tabelle 7: Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalte an der Granulatscheibe

Dabei wurde nach folgender Methode vorgegangen:

nach Entnahme der Scheibe aus dem Hochfrequenzfeld wurde die Temperatur an drei Stellen der Scheibe mittels eines 0,5 mm dicken Mantelthermoelementes gemessen. Anschließend wurden von diesen Stellen Granu-

latproben genommen und im Trockenschrank nachgetrocknet, wodurch die Restfeuchte bestimmt werden konnte. Verwendet wurde Feuchtmaterial der Zusammensetzung von Granulat A.

Eine Projektion dieser Ergebnisse auf die einzelnen Granülen mit definierten Abmessungen erlaubt eine Aussage über die Temperaturverteilung innerhalb der Granülen, da an den Granülen in der benötigten Größenordnung keine Messungen möglich sind.

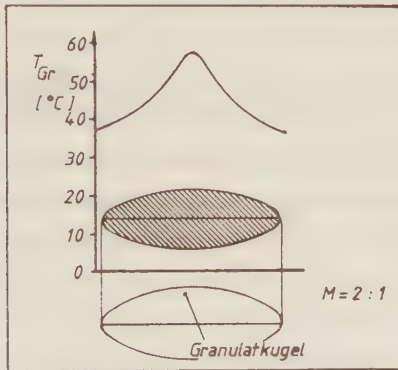


Abb. 59: Granulatkugel als Modell für Temperaturmessung

Überträgt man die gefundene Temperaturverteilung ausgehend von der bekannten Oberflächentemperatur, wobei der höchste, im kontinuierlich transportierten Gut auftretende Wert zugrunde gelegt wurde, so ergibt sich für die größtmögliche Granüle folgendes Resultat:

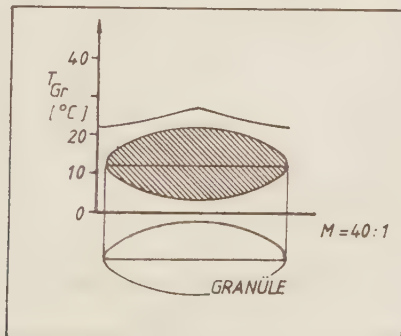


Abb. 60: Temperaturverteilung in der Granüle

Kleinere Granülen verfügen über ein noch flacheres Temperaturprofil. Daraus kann geschlossen werden, daß die Oberflächentemperatur nicht wesentlich von der Granulatinnentemperatur abweicht. Da die Oberflächentemperatur gleich der Ablufttemperatur gleichzeitig, daß die Zulufttemperatur nicht innerhalb beliebiger Grenzen variiert werden kann, wenn über die Kühlgrenztemperatur die Temperatur gesteuert werden und einen, die Wirkstoffe schädigenden Temperaturbereich nicht überschreiten soll. (vgl. Abb. 55, 56 und 57)

4.2.4.8 Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeit verschiedener Granulate mit unterschiedlicher Anfangsfeuchte

Der kontinuierliche Granulatdurchsatz läßt keine Aussage über die Trocknungsgeschwindigkeitsverteilung aus meßtechnischen Gründen zu, weswegen diese am Modell des Festbettes untersucht werden mußten. Die mangelnde Fluidisierung, die sich infolge fehlender Vibration negativ auf die Trocknungsgeschwindigkeit auswirkt, wird beim Festbettversuch durch eine längere Einwirkungszeit der Hochfrequenz ausgeglichen. Im Festbettversuch wurden die Granulate A (15 % Anfangsfeuchte) und C (9 %) verwendet. Die erhaltenen Trocknungsgeschwindigkeiten sind in Abb. 61 dargestellt.

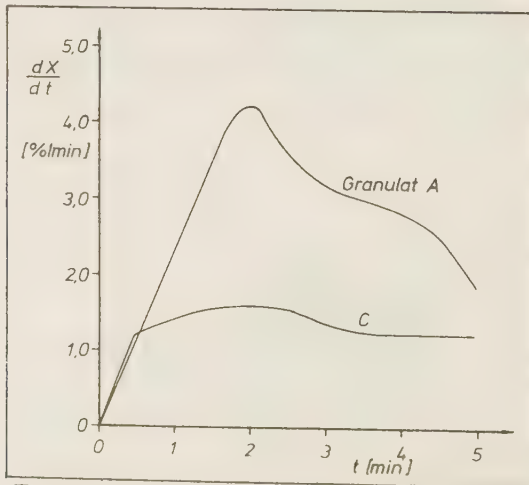


Abb. 61: Trocknungsgeschwindigkeit im Festbett

Nach 5 Minuten Verweilzeit wurden die Festbett Trocknungsversuche beendet, sodaß die Trocknungsgeschwindigkeitskurven an dieser Stelle abbrechen.

Im Festbett vollzieht sich an der Einzelgranüle über die Verweilzeit derselbe Trocknungsvorgang wie bei dem Transport durch den Trockner. Da Messungen am Granulat während der kontinuierlichen Trocknung nicht möglich sind, wurde die Feststellung des Feuchtegehaltes im stationären, luftdurchströmten Granulatbett vorgenommen, wenngleich dort die Trocknungsgeschwindigkeit geringer ist als im vibrationsfluidisiertes Gut.

Wird der im Festbett gemessene Trocknungsverlauf bei bekannter Verweilzeit und Restfeuchte auf die Verhältnisse im kontinuierlichen Trockner projiziert, so ergeben sich die in Abb. 62 gezeigten Zusammenhänge. Dabei wurde angenommen, daß sich in beiden Fällen ein übereinstimmender Trocknungsverlauf ergibt, der für den kontinuierlichen Prozeß zu höheren Geschwindigkeiten verschoben ist.

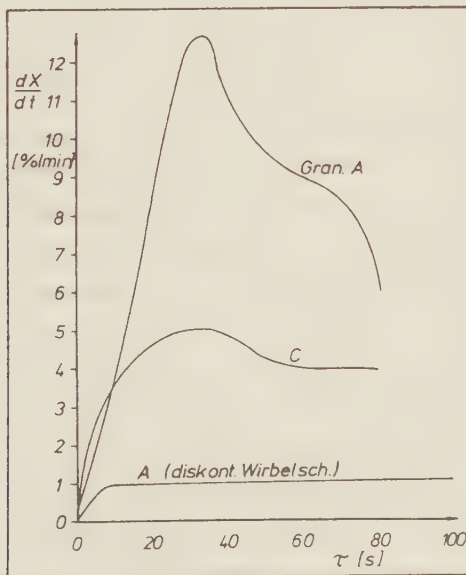


Abb. 62: Trocknungsgeschwindigkeiten im kontinuierlichen Versuch bei gegensinniger Luftströmung

4.2.4.9 Porosität und ihr Einfluß auf die Trocknungsgeschwindigkeit

Wie bereits beschrieben, hängt die Trocknungsgeschwindigkeit von der Größe der Poren im Gut ab, die darüber entscheidet, ob Knudsen-Molekulardiffusion, Porendiffusion oder Filmdiffusion des Wasserdampfes vorliegt, wobei die Porendiffusion sich aus Stefanischer Diffusion und Oberflächendiffusion zusammensetzt. Dementsprechend verhalten sich auch die Trocknungsgeschwindigkeiten. Für die Granulate des Typs A, C und E wurde die Porenradienverteilung sowie die spezifische Oberfläche α^* , die Porosität ϵ und das Porenvolumen v_p bestimmt. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse aufgeführt:

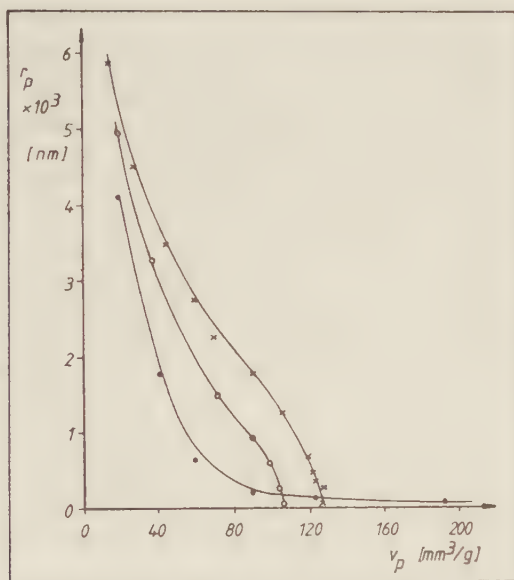
Granulat	α^* m^2/g	ϵ	v_p mm^3/g
A	0,33	0,15	107
C	0,46	0,17	129
E	1,6	0,22	208

Tabelle 8: Oberflächenspezifische Daten der eingesetzten Granulate

Die Porenvolumensummenkurven für die Granulate sind in Abb. 63 dargestellt. Der Vergleich der Summenkurve von Granulat A und C zeigt, daß bei A eine stärkere Verdichtung während der Granulation eingetreten ist, die eine Reduktion des spezifischen Porenvolumens zur Folge hat. Da sich die Zusammensetzung der Pulvermischung bei A nur wenig von der bei C unterscheidet, der Flüssigkeitsgehalt jedoch nahezu doppelt so groß ist, wird ein größerer Anteil der pulverförmigen Masse angelöst, sodaß ein, der Sinterung ähnlicher Effekt die groben Poren verkleinert.

Bei Präparat C ist die Porenvolumensummenkurve zum feineren Bereich verschoben, wobei nur ca. 1/6 des spezifischen Porenvolumens von Po-

ren der Radien 88 bis 13800 Å (8,8 nm bis $1,38 \cdot 10^{-5}$ m) aufgebracht wird.



Granulat E x Granulat C Granulat A

Abb. 63: Porenvolumensummenkurve für verschiedene Granulate

Granulat E enthält einen hohen Feinanteil, der auch bei der Feuchtverdichtung nicht durch Agglomeratbildung verschwindet. Dabei handelt es sich um mikrokristalline Substanzen, sodaß man die starke Zunahme des spezifischen Porenvolumens im Bereich 8,8 nm bis 13,35 nm verstehen kann.

In den folgenden Abbildungen wird der Einfluß der Porenradienverteilung auf die Trocknungsgeschwindigkeit sichtbar. Identische Pulvermassen wurden mit unterschiedlicher Verdichtung, d.h. mit unterschiedlichen Scherkräften verarbeitet, sodaß sich die Porenvolumensummenkurven deutlich voneinander unterscheiden.

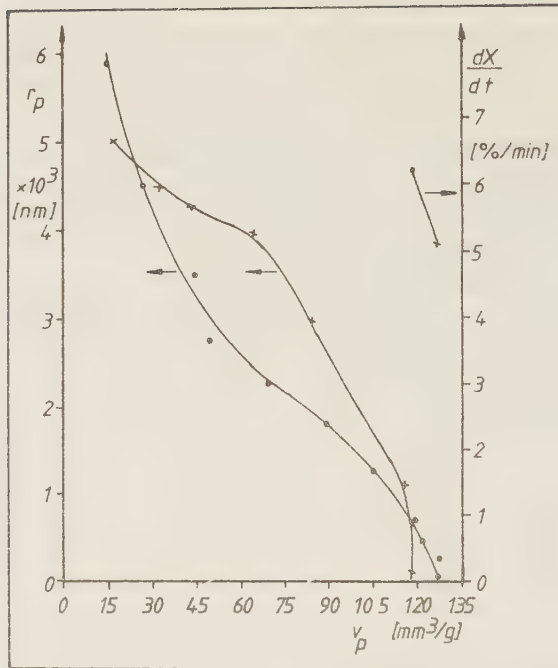


Abb. 64: Porenvolumensummenkurve unterschiedlich verdichteter Granulate in Relation zur Trocknungsgeschwindigkeit (Granulat C)

In Abb. 64 sind die Porenvolumensummenkurven von 2 identischen Granulatmassen, die mit verschiedenen Scherkräften verarbeitet wurden. Die mit den größten Scherkräften verarbeitete Pulvermasse zeigt die größte Verdichtung.

Gleichzeitig ist die mittlere Trocknungsgeschwindigkeit über das Porenvolumen aufgetragen.

Am rechten Randstab ist die Trocknungsgeschwindigkeit aufgetragen. Über den, für die beiden Granulate ermittelten Werte des Porenvolumens sind die mittleren Trocknungsgeschwindigkeiten eingetragen. Der Hochfrequenztrockner wurde bei beiden Versuchen unter gleichen Bedingungen gefahren. Da das spezifische Porenvolumen nahezu gleich ist, sind die Trocknungsgeschwindigkeiten von der Porenradienverteilung bedingt.

4.2.4.10 Verhalten thermolabiler Wirkstoffe bei der Trocknung

Wie bereits beschrieben wurde, kann die Ablufttemperatur in erster Näherung mit der Granulattemperatur gleichgesetzt werden. Da bei allen Versuchen die Messungen für die Temperatur der Abluft unterhalb 30°C lagen, dürfte im regulären Betriebszustand auch die Temperatur des Granulates diesem Wert entsprechen. Um einen näheren Überblick über die Temperaturbelastung der Granulen während der Trocknung zu erhalten wurden temperaturempfindliche pharmazeutische Wirkstoffe dem Granulat beigemischt. Diese Wirkstoffe zerfallen bei Temperaturen oberhalb eines substanzspezifischen Wertes. Nach der Trocknung wurden Proben aus dem, den Trockner verlassenden Gutstrom gezogen und analytisch auf Abbauprodukte untersucht. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengefaßt:

Granulat	Wirkstoff	Temperaturgrenze des Zerfalls	Wirkstoffgehalt im Granulat (theor.)	Wirkstoffgehalt (% v. th. Wert)	Abbauprodukte (% v. th. Wert)
A	Benzocain	40°C	1%	100	0
C	Benzocain	40°C	1%	100	0
A	Ergotalkaloid	50°C	1%	100	0
C	Ergotalkaloid	50°C	1%	100	0
E	Coffein	50°C	30%	100	0

Tabelle 9: Wirkstoffgehalte getrockneter Granulate (temperaturindizierende Wirkstoffe)

Auch beim Benzocain, das mit 40°C die geringste thermische Beständigkeit besaß, konnten keine Abbauprodukte nachgewiesen werden. Damit ist gezeigt, daß während des Trocknungsvorgangs die Temperatur von

40 °C zumindest nur sehr kurzzeitig erreicht wurde.

4.3 Berechnung des Wirkungsgrades

Aus den Versuchsergebnissen an Versuchsanlage II wurden die Wirkungsgrade der verschiedenen Betriebszustände ermittelt. Es wird ein thermischer Wirkungsgrad gebildet, der in Gleichung (65) definiert ist:

$$\eta_{\text{therm}} = \frac{\dot{m}_{\text{Gr}} \Delta H_v}{P \cdot t} \quad (65)$$

t ist dabei die Zeit, in der $\dot{m}$ durchgesetzt wird. Er wird als thermischer Wirkungsgrad definiert, weil er die zur Verdampfung des Wassers notwendige Energie in Abhängigkeit zur ins Hochfrequenzfeld eingebrachten Energie setzt.

Meßgrößen		34a	34b	35a	35b	35c	35d	35e
d_2	mm	10	12	10	8	5	7	5
$X_o - X_E$	%	10,8	9,0	3,6	6,4	6,7	7,1	12,7
m	kg/h	10,1	10,8	3,6	4,7	3,4	4,7	6,0
P_{HF}	kW	7,3	7,5	3,6	5,2	4,8	6,2	7,3
Q_v	kJ	691	738	246	320	231	320	435
$Q_{\Delta T}$	kJ	39	12	114	200	249	300	295
η_{therm}	%	95	98	68	62	48	48	60
η_{ges}	%	40	41	25	32	30	36	26

Tabelle 10: Wirkungsgrad – relevante Daten ausgewählter repräsentativer Versuche (Versuchsreihe 34: Granulat C
Versuchsreihe 35: Granulat A)

Weiterhin wird ein Gesamtwirkungskreis angegeben, der aus der zur Verdampfung des Wassers notwendigen Energie und der Gesamtenergie gebildet wird. Im Gegensatz zum thermischen Wirkungsgrad berücksichtigt der Gesamtwirkungsgrad auch den Energiebedarf der Ventilatoren, des Vibrationsantriebes, der Generatorheizung und der anderen Hilfsantriebe. Die Leistungsaufnahme dieser Aggregate beträgt 10 kW. Der Gesamtwirkungsgrad läßt sich aus Gleichung (66) ermittelt:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{m \Delta H_v}{I_{\text{ges}} 380 V \cdot \cos \varphi t} \quad (66)$$

$\cos \varphi$ ist der Verschiebungswinkel und wird bei dieser Anlage mit 0,6 angegeben.

In Abbildung 66 ist die Gesamtleistungsaufnahme über der ausschließlich vom Hochfrequenzfeld aufgenommenen Leistung dargestellt. Infolge des höheren Leistungsbedarfs der Hilfsaggregate verschiebt die Grundlast von 10 kW die Gerade zu höheren Gesamtleistungswerten. Je höher die vom Hochfrequenzfeld aufgenommene Leistung ist, desto günstiger wird der Gesamtwirkungsgrad.

In Abb. 65 ist der thermische Wirkungsgrad als Funktion der Schichtdicke graphisch dargestellt.

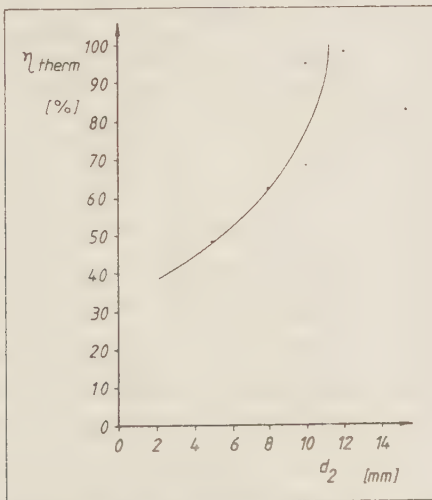


Abb. 65: Darstellung der gemessenen Wechselwirkungen zwischen der Schichtdicke und dem Wirkungsgrad

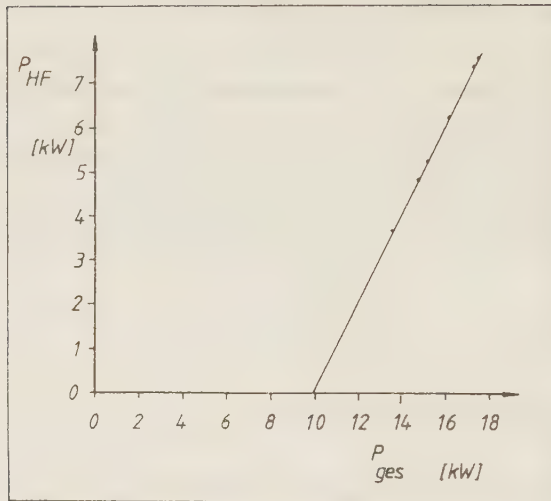


Abb. 66: Abhängigkeit der Gesamt-Leistungsaufnahme von der Hochfrequenz-Leistungsaufnahme

4.4 Kostenvergleich

Um einen Überblick über die für Trocknungsanlagen aufzuwendenden Kosten zu erhalten, wurde ein Vergleich der Kapitalkosten innerhalb eines groben Richtpreisvolumens erstellt. Die ermittelten Kosten für eine Anlagenkapazität von kg/h sind in Tabelle 11 aufgeführt.

		disk. Wirbelschicht-trockner	kont. Wirbel-schichttrockner	Hochfrequenz-trockner
Durchsatzleist.	kg/h	250	250	250
Verdampfungs-leistung	kg/h	50	50	50
Invest.kosten	TDM	350	240	215
Relation	%	100	69	61

Tab. 11: Vergleich der Investitionskosten verschiedener Trocknungs-technologien

Die Investitionskostenangabe für den Hochfrequenztrockner beruht auf einer Extrapolation der Pilotanlagekosten unter Berücksichtigung des Mehrpreises für eine verbesserte Ausstattung.

Der Energieverbrauch wurde für die verschiedenen Trocknungsverfahren ermittelt und in Tabelle 12 zusammengestellt. Den aufgelisteten Werten liegt ein Granulat des Granulattyps C zugrunde. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß die Hochfrequenzwirbelschichttrocknung günstigere Verbrauchswerte liefert als die konventionelle diskontinuierliche oder kontinuierliche Wirbelschicht.

		kont. Vibrations- fließbett	diskont. Wirbel- schicht	Hochfrequenz- fließbett
Durchsatz	kg/h	200	280	100
Massestrom Wasser	kg/h	20	28	10
theor. Energiebedarf	kW	13,7	19,2	6,9
therm. Energiebedarf (gemessen)	kW	17,5	50,6	7,0
Energiebedarf gesamt	kW	28,0	58,1	17,0
therm. Wirkungsgrad η_{therm}	%	78	38	99

Tabelle 12: Vergleich der Betriebskosten verschiedener Trocknungstechnologien

5 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der Untersuchungen war es, ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, Granulate mechanisch und thermisch schonend zu trocknen. Die Kombination von Vibration und Wirbelbett mit Luft und Energieeintrag durch ein Hochfrequenzfeld führt zu einem Trocknungsverfahren, bei dem die ursprüngliche Agglomeratstruktur des Granulates erhalten bleibt und Wirkstoffe, die bereits bei 40^oC zerfallen, in ihrer chemischen Struktur unverändert getrocknet werden.

Es gelang vom Trocknungsprinzip der dielektrischen Erwärmung aus-

gehend, zu einem praktisch nutzbaren Verfahren zu gelangen. Mit Hilfe von Vorversuchen in einer Anlage zur Trocknung von Garnen konnte gezeigt werden, daß pharmazeutische Granulate prinzipiell unter Einwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen getrocknet werden können. Wirk- und Hilfsstoffe als Bestandteile der Granulatmasse erwiesen sich als gute Dielektrika. Damit war eine Grundvoraussetzung für weitere Versuche geschaffen.

Wird die Schüttung auf einem Band als Quasifestbett durch das Hochfrequenzfeld hindurchgeführt, so stellt sich heraus, daß oberhalb einer bestimmten Schichtdicke des Granulatbettes die Diffusionsperre für die Brüden so stark wird, daß die Brüden als Leistungsrezeptoren in hohem Maße im Gut verbleiben. Die Leistungsaufnahme durch sie führt dazu, daß die Grenztemperaturen überschritten werden. Da die Feuchtigkeit zudem im Gut verbleibt, entsteht eine feucht-heiße Atmosphäre in den Pellets, die den Wirkstoffabbau begünstigt. Daraus geht hervor, daß die Vorteile der Energiezuführung durch ein Hochfrequenzfeld für die Trocknung von temperaturempfindlichen Granulaten nur dann nutzbar sind, wenn es gelingt, die Geschwindigkeit des Stoff- und Wärmetransportes aus dem Gut heraus der Geschwindigkeit des Energieeintrages in das Feuchtgut anzupassen.

Die Abführung der Brüden und damit der Energie kann mittels eines Luftstromes in eine Wirbelschicht leicht beherrscht werden. In Abhängigkeit der Porosität und der Anfangsfeuchte ergibt sich die für jeden Granulattyp spezifische Trocknungsgeschwindigkeit, die, verglichen mit denen aus anderen Verfahren, um ein Vielfaches höher liegt. Die Leistungsaufnahme des Gutes erfolgt durch die Feuchte des Granulates. Infolgedessen wird die Wärme bevorzugt an den Stellen erzeugt, an denen die höchste Konzentration an Wasser vorliegt. Die Leistungsaufnahme des trockenen Gutes ist gering.

Um einen Überblick über die Erwärmung einer Granüle im Hochfrequenzfeld zu erhalten, wurden etwas größere feuchte Granulatkügelchen hergestellt, und deren Erwärmung nach Durchlaufen des Hochfrequenzfeldes gemessen. Dabei stellte sich heraus, daß die Temperaturerhöhung im

Inneren der Granüle gegenüber der Oberfläche der Granüle nur gering ist.

Die Granulattemperatur im Verlaufe des Trocknungsprozesses und die Temperatur der Abluft wurden gemessen. Dabei stellte sich heraus, daß zwischen der Granulattemperatur und der Ablufttemperatur geringfügige Differenzen vorhanden sind. Das erlaubt es, die Temperaturbelastung der Granülen anhand der Ablufttemperatur laufend zu überwachen.

Wirkt der Guttransport durch die Vibration und durch die Luft gleichsinnig, so wird bei Überwiegen des Vibrationstransportes die trockene Granüle schneller durch das Hochfrequenzfeld gefördert als die schwerere feuchte Granüle. Damit kann die Verweilzeit der einzelnen Granülen weitgehend dem Feuchtigkeitstransport angepaßt und damit die Leistung des Trockners verbessert werden.

Weiter hat sich gezeigt, daß bei dem Verfahren die Granulattemperatur während der Trocknung in erster Näherung als konstant angesehen werden kann. Bei vergleichbaren Trocknern, die in der Pharma- oder artverwandter Industrie eingesetzt werden, hat die Produkttemperatur eine Bandbreite bis zu 30°C , wobei die Temperatur mit abnehmender Feuchtigkeit ansteigt.

Der thermische Wirkungsgrad der untersuchten Pilotanlage hatte sehr hohe Werte, wie sie von den herkömmlichen Trocknern nicht erreicht werden. Er ist deswegen so hoch, weil nur das im Gut vorhandene Wasser Energie aufnimmt, nicht aber die Feststoffe.

Der neue dielektrische Trockner mit luftdurchströmtem Vibrationsfließbett ist somit für die Entfeuchtung empfindlicher, thermisch und mechanisch instabiler Granulate, Pellets oder ähnlich strukturierter Massen eine interessante neue verfahrenstechnische Möglichkeit.

6 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob das Verfahren der dielektrischen Erwärmung für die Trocknung temperaturempfindlicher Schüttgüter, insbesondere pharmazeutischer Granulate anwendbar ist.

Die Untersuchung wurde in zwei Teilen durchgeführt. Erstens wurde ge-

prüft, wie sich ein Hochfrequenzfeld auf trockenes und feuchtes Gut auswirkt und wie weit die Feststoffe von pharmazeutischen Granulaten im Hochfrequenzfeld zu molekularen Schwingungen angeregt werden. Zweitens wurde die Abführung von Wärme und Brüden aus dem im Hochfrequenzfeld befindlichen Schüttgut untersucht.

Vorversuche zu diesem Zweck wurden an einem Bandtrockner vorgenommen. Es ergab sich, daß die Trocknung niedriger Schichtdicke ohne thermische Schädigung der Wirkstoffe verläuft. Mit steigender Schichtdicke nimmt die Temperatur in der Schüttung zu. An der Oberfläche der Schüttung sorgte bei der für die Garntrocknung ausgelegten Versuchsanlage I ein quer zur Transportrichtung geführter, tangential die Oberfläche überstreichender Luftstrom für eine getrocknete Schicht am oberen Rand des Bettes. In Richtung auf das Transportband werden die Verhältnisse immer ungünstiger.

Daraus entstand die Konstruktionsidee für eine Pilotanlage, bei der das Granulat mittels Vibration durch das Hochfrequenzfeld transportiert und gleichzeitig eine, von unten mit Luft durchströmte Wirbelschicht erzeugt wird. Eine schnelle Brüden- und Wärmeabführung erreicht, daß die Trocknung mit hoher Geschwindigkeit ablaufen kann. Es wurde gefunden, daß die Ablufttemperatur mit der Granulattemperatur übereinstimmt. Daher kann durch laufende Messung der Ablufttemperatur der Trocknungsprozeß verfolgt und gesteuert werden.

Wenn die Richtung der durch den Siebboden hindurchtretenden Luft mit der des Vibrationsantriebes übereinstimmt, kann die Trocknung gegenüber der gegensinnigen Orientierung der Luftströmung zur Transportrichtung beschleunigt werden.

Der Einfluß der Porosität auf den Ablauf der Trocknung wurde in einer besonderen Versuchsreihe untersucht. Mit abnehmender Porosität wurde eine Verzögerung der Trocknung beobachtet.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergab, daß die Trocknung mit Hochfrequenz im Vibrationsfließbett einen geringeren Energieaufwand als Wirbelschicht und konventionelles Vibrationsfließbett erfordern. Auch der Investitionsaufwand ist vergleichsweise günstig.

Insgesamt wird gezeigt, daß mit der Trocknung im Hochfrequenzfeld eine schonende Trocknung temperaturempfindlicher Güter wirtschaftlich möglich ist.

Zeichenerklärung:

A	Fläche
A_{HF}	Fläche die vom Hochfrequenzfeld überstrichen wird
A_P	Poren querschnittsfläche
B	Breite
C	Kondensatorkapazität
D	Dämpfungskonstante
D_D	Diffusionsbeiwert
E	Feldstärke
E_A	Aktivierungsenergie
F	Kraft
F_o	Erregerkraft
G	Amplitude
H	Enthalpie
I	Strom
J	Proportionalitätsfaktor
J_s	Oberflächendiffusionskoeffizient
K	Maschinenkonstante
K_W	Wirkstoffgehalt
L	Länge
M	Masse
M	Massenstrom
M_W	Molgewicht des Wassers
M_L	Molgewicht der Luft

O	Oberfläche
P	Leistung
Q	Energie
R_r	Resonanzfunktion
R_D	Gaskonstante für Wasserdampf
R_p	elektrischer Widerstand
S	Oberfläche der Schüttung in der Wirbelschicht
T	Temperatur
U	Spannung
X	Feuchtegehalt
V	Volumen
V_{tot}	Schüttvolumen
a	Temperaturleitzahl
b	Bewegungsbeiwert
c	Federkonstante
c_s	Oberflächenkonzentration (g/cm^2)
d	Elektrodenabstand
d_1	Höhe des Luftspaltes zwischen Elektrode und Schüttung
d_2	Schichtdicke des Schüttgutes
d_h	hydraulischer Durchmesser
d_p	mittlerer Kornmesser
f	Frequenz
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe

h_L	Höhe der Wirbelschicht
k	Geschwindigkeitskonstante
k_v	Geschwindigkeitskonstante der Trocknung
m	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
m_o	Erregermasse
P	Druck
q	Wärmestromdichte
r_o	Radius des Schwerpunktes vom Drehpunkt
s	Dicke der Schüttung
t	Zeit
t_k	Korrekturfaktor für Transportgeschwindigkeit
u	Strömungsgeschwindigkeit
u_{mf}	Strömungsgeschwindigkeit bei Minimalfluidisation
v_h	horizontale Transportgeschwindigkeit (theoretisch)
$\dot{v}_h$	horizontale Transportgeschwindigkeit (gemessen)
x	Koordinate
x_d	Quotient aus Dicke des Luftspaltes und Schichtdicke
y	Koordinate
z	Proportionalitätsfaktor
α	Wärmeübergangskoeffizient
α'	Stoffaustauschkoeffizient

α^*	spez. Oberfläche der Schüttung
β	Wurfwinkel
γ	spez. Gewicht
δ	Verlustwinkel
ϵ'	Dielektrizitätskonstante
ϵ_0'	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
ϵ	Porosität
η_t	Wirkungsgrad
η	dynamische Viskosität der Luft
ϑ	Temperatur
ϑ_s	Tortuositätsfaktor bei Oberflächendiffusion
χ	Korrekturfaktor für Transportgeschwindigkeit
λ	Wärmeleitkoeffizient
μ_L	Längenwiderstandsfaktor
ν	kinematische Viskosität
ν_A	Abstimmungsverhältnis
ρ	Dichte
ρ_D	Dämpfungsfaktor
τ	Verweilzeit
φ	Wärmeerzeugungskenngröße
ω	Kreisfrequenz
<u>Indizes</u>	
D	Dampf
B	Boden

T	Temperaturerhöhung
E	Ende
Err	Erreger
Fl	Fluid
Gr	Granulat
HF	Hochfrequenz
Kn	Knickpunkt
L	Luft
LP	Lockerungspunkt
O	Oberfläche
R	Resonanz
R_f	Restfeuchte
S	Schüttung
TG	Trockengut
V	Verdampfung
W	Wasser

Literaturverzeichnis

- (1) LIST, P.H.
Arzneiformenlehre, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft
mbH Stuttgart (1976)
- (2) EHRHARDT, L.
Vorlesungsmanuskript (unveröffentlicht), Universität Erlangen-
Nürnberg (1976)
- (3) SCHEPKY, G.
Hochfrequenz - Kurzzeittrocknung, Pharmazeutische Industrie 34
Nr. 10 (1972)
- (4) TRAVERS, D.N., MEREDITH, R. J.
Microwaves, Process Eng. (GB) 96, (1975)
- (5) FELBER, N.
Patentanmeldung DOS F 14420
- (6) BRÜNING, H.
Elektrische Ausrüstung 6, (1973)
- (7) GRASSMANN, H. C.
Chemiefasern 9, (1967)
- (8) SIMMEN, E.
Theoretische Grundlagen der Hochfrequenzerwärmung von Isolier-
stoffen, BBC, Baden/CH (1968)
- (9) MOELLER, F., FRICKE, H.
Grundlagen der Elektrotechnik, B. G. Teubner Stuttgart (1974)
- (10) GRASSMANN, H. C.
Int. Zeitschrift für Elektrowärme 25, (1967)
- (11) PETER, S.
Vorlesungsmanuskript (unveröffentlicht) Universität Erlangen-
Nürnberg (1976)
- (12) KNEULE, F.
Das Trocknen, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt/M. (1975)
S. 211f

- (13) ECKERT, E.R.
Einführung in den Stoff- und Wärmeaustausch, 3. Aufl. Springer-Verlag Berlin, (1966)
- (14) LUIKOV, A.V.
Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies, Pergamon-Press New York P 230 f
- (15) HARMATHY, T. Z.
I & EC Fundamentals Vol. 8, No. 1 P 92-103 (1969)
- (16) KNEULE, F.
Das Trocknen, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt/M. S. 58 f (1975)
- (17) KNEULE, F.
Das Trocknen, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt/M. S. 78 f (1975)
- (18) KÖBLITZ, TH. et al.
Pharm. Ind. 44 (1982)
- (19) PERKIN, R.M.
Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 23 pp 687-695 Pergamon-Press New York (1980)
- (20) MOLERUS, O.
Vorlesungsskript "Mech. Verfahrenstechnik" Universität Erlangen-Nürnberg (1977)
- (21) PALANCZ, B.
Chemical Engineering Science Vol. 38 No. 7, pp 1045-1059 (1983)
- (22) REH, L.
C I T 46 (1974)
- (23) WERTHER, J.
Vortrag am Jahrestreffen der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemie-Ingenieur-Wesen (GVC) 1983
- (24) KUNII, D., LEVENSPIEL, O.
Fluidization Engineering, Wiley New York (1969)

- (25) KRISCHER, O.
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik
Springer Verlag Berlin, S.421 (1978)
- (26) THELEN, G.
Stetigförderer, VEB-Verlag Technik Berlin
- (27) GERTHSEN, CH., KNESER, H.O., VOGEL, H.
Physik, Springer-Verlag Berlin, (1974)
- (28) SALZER, G.
Stetigförderer, Kraußkopf-Verlag Mainz (1964)
- (29) PLUTA, W., MIROW, H.
Chem.Rundschau 36, 5 (1983)
- (30) SCHEPKY, G.
Pharmazie in unserer Zeit 3, 4 (1974)
- (31) MÜLLER, H., MORGENSTERN, W.
Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen (1965)
- (32) HUANG, H.F., YATES, R.A.
J.Microwave Power (Canada) Vol.15, No.1, 15-17 (1980)
- (33) ALT, CH.
Chemie-Ing.-Technik 37, (1965)
- (34) MC CORNICK, P.Y.
Industrial and Engineering Chemistry 58, (1966)
- (35) SOBIECH, W.
J.Microwave Power (Canada) Vol.15 No.3, 143-54 (1980)
- (36) HOLME, I., METAXAS, A.C.
J.Microwave Power (Canada) Vol.14, No.4, 367-82 (1972)
- (37) LEFEUVRE, S., PARESI, A., AHMADPANAH, H.
Proceeding of the 8th European Conference, 835 P., 579-83
Sevenoaks England, Microwave Exhibitions and Publishers LTD
(1978)

- (38) SHALATOV, A., KARDASHEV, G. A., PROZOROV, E. N.,
YURCHENKO, Y. B.
Khim. Mashinostroenie, (1976) P 73-8, No. 6
- (39) RINGER, D. U., MUJAMDAR, A. S.
Chem.-Ing.-Techn. 54, No. 7, 686-687 (1982)
- (40) KAREL, M.
Vortrag auf dem 1. Kongreß Nahrungsmitteltechnik (INATEC)
Köln (1983)
- (41) DÖRNYEI, J.
Vortrag auf dem 1. Kongreß Nahrungsmitteltechnik (INATEC)
Köln (1983)
- (42) NIEDIEK, E. A.
Vortrag auf dem 1. Kongreß Nahrungsmitteltechnik (INATEC)
Köln (1983)
- (43) HEIN, LEHMANN AG., Prospekt "Conidur-Feinlochblech)
- (44) BREMECKER, K.-D.
Pharm.-Ind. 45, Nr. 1 (1983)
- (45) KRISCHER, O.
Verfahrenstechnik, VDI-Beiheft nr. 1 (1940)
- (46) KRISCHER, O.
Die wiss. Grundlage der Trocknungstechnik
Springer Verlag Berlin, S. 246 (1978)
- (47) GRASSMANN, P., WIDMER, F.
Einführung in die thermische Verfahrenstechnik
Walter de Gruyter Berlin (1974)
- (48) FRITZ, W.
Chem.-Ing.-Tech. 54, Nr. 4, S. 382-385 (1982)
- (49) SCHUBERT, H., GRÜNEWALD, TH.
Chem.-Ing.-Tech. 55, Nr. 7, S. 553-555 (1983)

- (50) POPERT, F.
Firmeninterner Sonderdruck, Brown, Boveri & Cie. Baden/
Schweiz (1973)
- (51) LASZLO, T. S.
Phys. Teach (USA) Vol. 18, No. 8, 570-9 (1980)
- (52) BIKIN, H., JENKINS, G. L., DEKAY, H. G.
Journal of American Pharmaceutical Association Sci. Edn. 38
(1949) 245-47
- (53) MÜLLER, H.
Elektrotechnische Zeitschrift (VDE) 71, No. 22 (1950)
- (54) LEFEUVRE, S.
Phys. Technol. Vol. 12, No. 4, 155-161 (1981)
- (55) ARNESTAD, K. G.
Backen mit Hilfe des Hochfrequenz-Infrarot-Verfahrens
Mitteilung des Zentralinstitut für industrielle Forschung, Oslo
- (56) LEFEUVRE, S.
Conference Proceedings of the 10th European Microwave Con-
ference 774 P., 227-31 (1980)
- (57) KRISCHER, O.
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik
Springer Verlag Berlin, S. 292 (1978)
- (58) SATTLER, K.
Thermische Trennverfahren, Vogel-Verlag, Würzburg (1977)
- (59) MOLERUS, O., PAHL, M. H., RUMPF, H.
C I T 43, S. 376-378 (1971)
- (60) REH, L.
C I T 46, S. 180 (1974)
- (61) MOLERUS, O.
C I T 39, S. 341-348 (1967)
- (62) VDI-Wärmeatlas, 3. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf (1977)

- (63) SATTERFIELD, C.N.
Mass Transfer of Heterogenous Catalysis, M.I.T. Press
Cambridge (1970)
- (64) BAUER, W.
Einfluß der Gasverteilerkonstruktion auf Stoffaustausch-
und Reaktionsverhalten flacher Wirbelschichten
Dissertation Erlangen (1980)
- (65) WERTHER, J.
Chem.-Ing.-Technik 49 (1977) 10, S. 777
- (66) WERTHER, J., HEGNER, B.
Chem.-Ing.-Techn. 52 (1980) 2, S. 106

ANHANG

Zahlenbeispiel 1:

$$d_2 = 10 \text{ mm} = \text{const. (Annahme)}$$

$$\varepsilon_2' = 12 = \text{const. (Annahme)}$$

Daraus ergibt sich folgende Zahlentabelle:

d_1	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
P	28,4	18,6	10,0	6,1	4,15	2,3	1,4	1,0	0,7	0,5

Tabelle I : Trendanalyse zwischen Größe des Luftspaltes D und der Leistungsaufnahme des Granulates anhand eines Zahlenbeispiels

d_2	= 10 mm									
d_1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
P	20,0	21,3	19,5	17,7	14,5	12,1	10,4	9,1	8,1	7,3
U	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1400	1600

Tabelle II : Trendanalyse unter Berücksichtigung der Elektrodenspannung

d_2	= 20 mm									
d_1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
P	25,1	33,1	35,3	35,0	32,4	29,3	26,5	24,0	21,9	20,9
U	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1400	1600

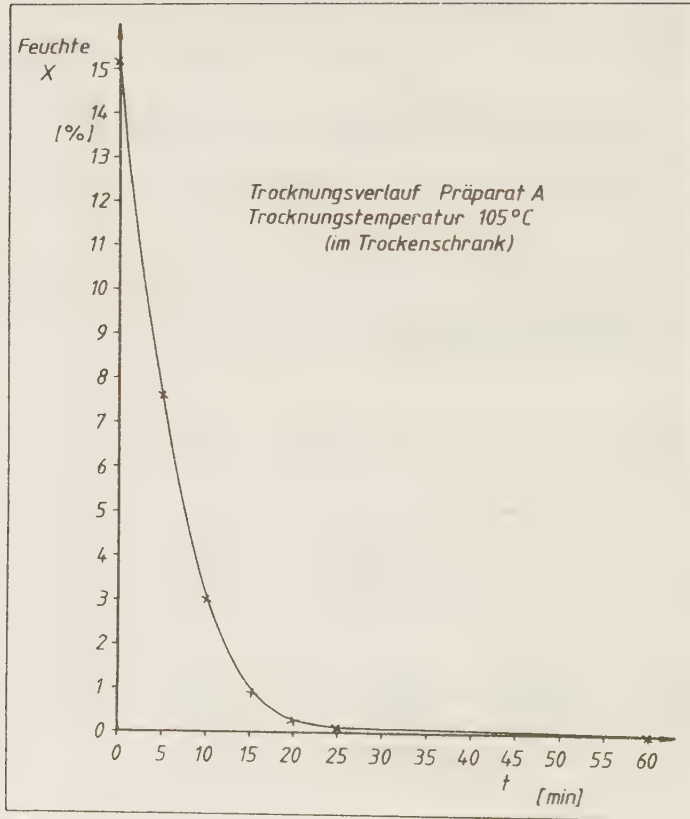
Tabelle III : Trendanalyse

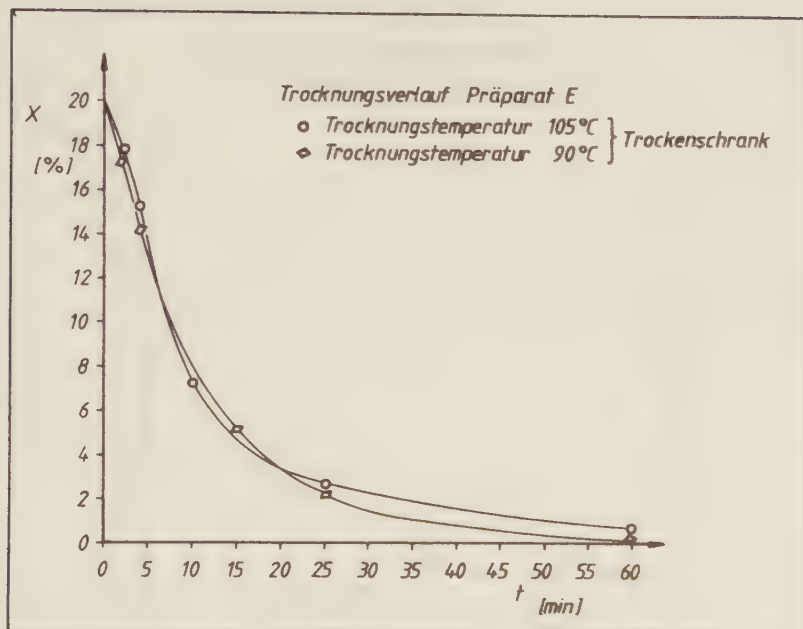
Zahlenbeispiel 2: $d_2 = 10 \text{ mm}$ (Tabelle 13) $d_2 = 20 \text{ mm}$ (Tabelle 14) $\epsilon'_2 = 9$												
d_1	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	12,0	20,0
U	50	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	2400	4000
P	10	14	17	16	15	13	11	10	9	7	4	2

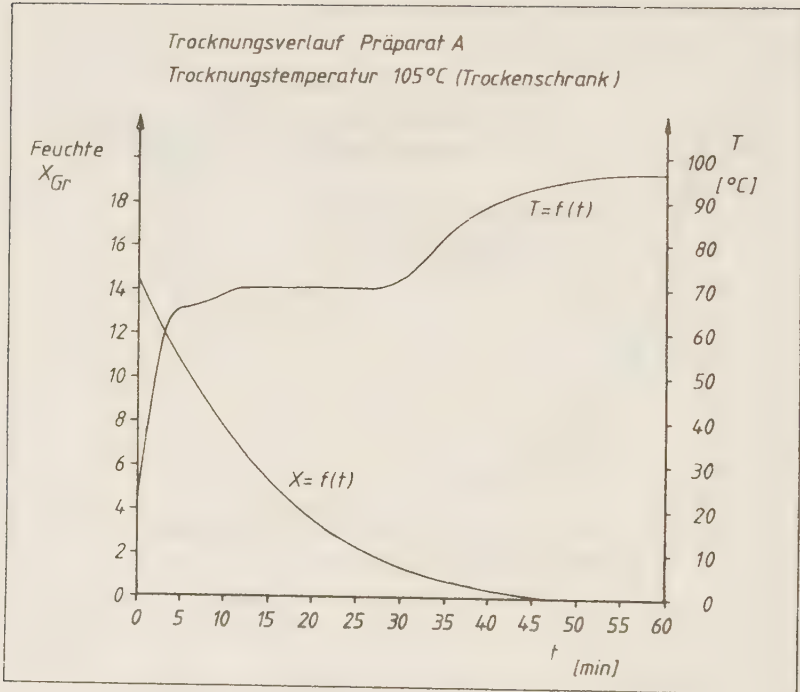
Tabelle IV : Trendanalyse zwischen der Größe des Luftspaltes d_1 und der Leistungsaufnahme des Granulates bei einer Schichtdicke $d_2 = 10 \text{ mm}$

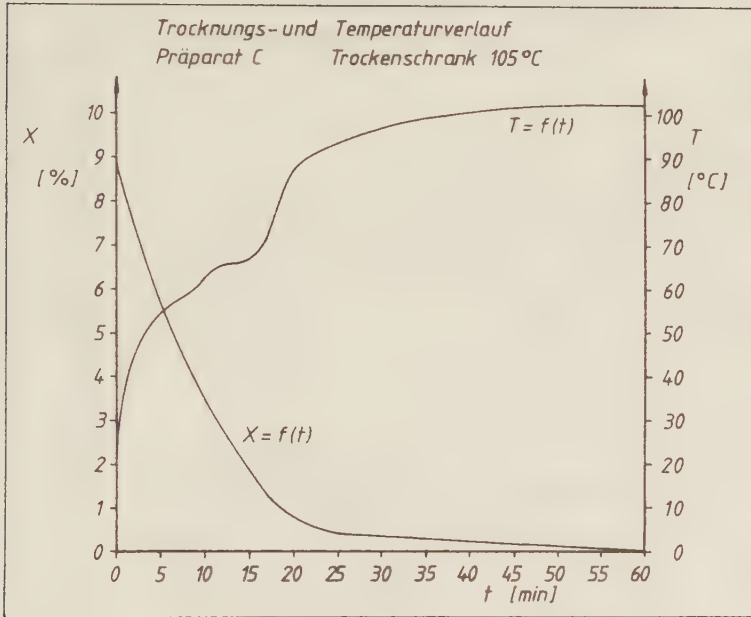
d_1	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	12,0	20,0
U	50	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	2400	4000
P	20	33	47	53	55	54	51	46	44	39	29	20

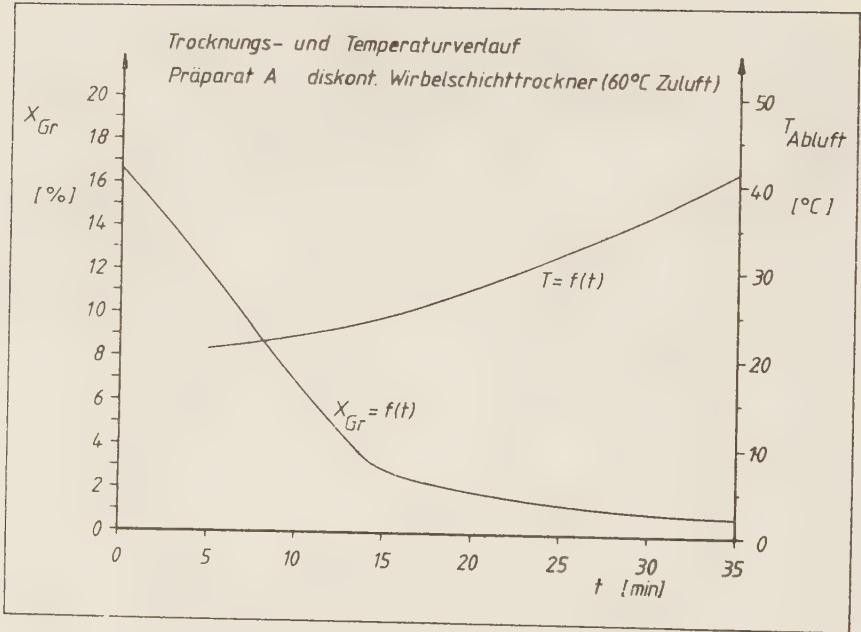
Tabelle V : Trendanalyse zwischen der Größe des Luftspaltes d_1 und der Leistungsaufnahme des Granulates bei einer Schichtdicke von $d_2 = 20 \text{ mm}$

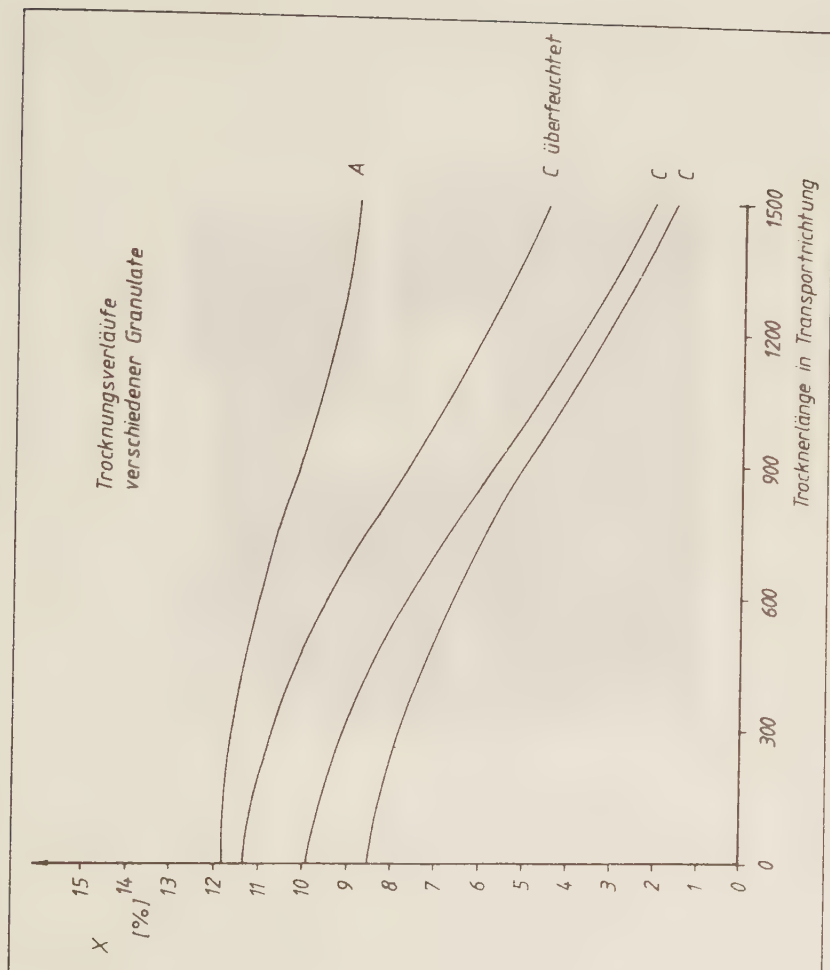


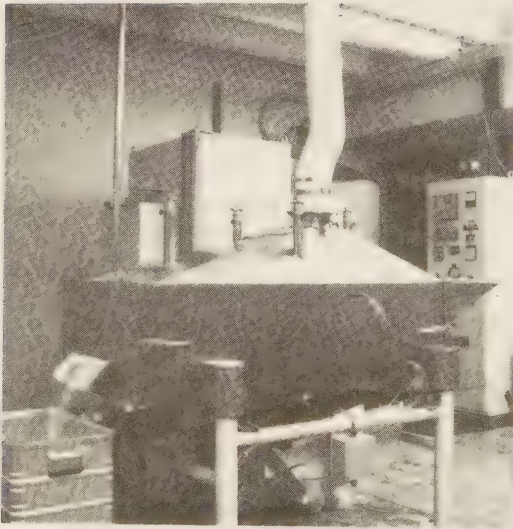












Versuchsanlage II

Lebenslauf

1953	Geboren am 17. September in Nürnberg
1960 - 1964	Besuch der Grundschule in Nürnberg
1964 - 1974	Besuch des humanistischen Neuen Gymnasiums in Nürnberg mit Abschluß Abitur
1974 - 1975	15 Monate Wehrdienst
1975 - 1979	Studium des Chemie-Ingenieur-Wesens/Verfahrenstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomhauptprüfung
1979 - 1980	Diplomarbeit am Lehrstuhl für Apparatetechnik und Anlagenbau in Erlangen
Juni 1980	Eintritt in die Entwicklungsabteilung der Sandoz AG in Nürnberg
Mai 1981	Beginn der Arbeiten für die Dissertation
Oktober 1981	Heirat
Januar 1983	Verleihung des Pharmatechnikpreises 1982
Februar 1983	Geburt der Tochter Kathrin

